

UNIVERSIDAD DE PANAMÁ
VICERRECTORIA DE INVESTIGACIÓN Y POSTGRADO
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

**EFFECTO DE LA RETENCIÓN DE FÓSFORO EN SUELOS DE LA REGIÓN DE
AZUERO EN EL CULTIVO DE MAÍZ.**

JORGE IVÁN NÚÑEZ CANO
C.I.P: 7-702-711

**TESIS PRESENTADA COMO UNO DE LOS REQUISITO PARA OPTAR POR
EL TÍTULO DE MAGISTER EN CIENCIAS AGRÍCOLAS CON ÉNFASIS EN
MANEJO DE SUELOS Y AGUA.**

PANAMÁ, REPÚBLICA DE PANAMÁ

2018

**EFFECTO DE LA RETENCIÓN DE FÓSFORO EN SUELOS DE LA REGIÓN DE
AZUERO EN EL CULTIVO DE MAÍZ.**

**TESIS PRESENTADA COMO UNO DE LOS REQUISITOS PARA OBTENER EL
GRADO DE MAGISTER EN CIENCIAS AGRÍCOLAS CON ÉNFASIS EN MANEJO
DE SUELOS Y AGUA**

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

APROBADO POR:

Dr. José E. Villarreal Núñez
Asesor

M.Sc. Román Gordón Mendoza
Miembro

M.Sc. Jorge E. Franco Barrera
Miembro

2018

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a Dios, por darme todo lo necesario para culminar con éxito esta meta personal y profesional. A mi hijo, Evan Felipe, mi mayor tesoro, a quien quiero desmedidamente, a mi amada esposa, Yelys Del Carmen por apoyarme en todo momento, a mis padres Claudina y Manuel, mis hermanos Nolo y Luis por confiar siempre en mis capacidades para salir adelante en todo lo que me proponga. A familiares y amigos que siempre han creído en mí. Se les quiere....

Jorge Iván Núñez Cano

“Nunca consideres el estudio como un deber, sino como una oportunidad para penetrar en el maravilloso mundo del saber” - Albert Einstein.

AGRADECIMIENTO

Me gustaría que estas líneas, sirvieran para expresar mi más profundo y sincero agradecimiento a todas aquellas personas que con su ayuda han colaborado en la realización del presente trabajo. A la Universidad de Panamá, a través del Centro Regional Universitario de Los Santos, por haberme permitido estudiar esta maestría en sus instalaciones. Al Instituto de Investigación Agropecuaria de Panamá, en especial al programa de Maíz y al Laboratorio de Suelos, por todo el apoyo logístico y técnico-científico brindado.

También, me gustaría agradecer por toda la ayuda recibida al director de este trabajo Dr. José Villarreal. A MSc. Román Gordón y MSc. Jorge Franco Barrera por su orientación oportuna y valiosos aportes.

A mis amigos y compañeros Jorge Jaén, Ana Sáez, Luis Alberto Barahona, Jorge Castro, Jhon Villalaz, Adolfo Santos, Yarisbel Vásquez, Cintya Atencio y Domitilo Domínguez gracias mil por su valiosa colaboración.

Jorge Iván Núñez Cano

INDICE GENERAL

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTO	ii
INDICE GENERAL	iii
ÍNDICE DE CUADROS	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
CAPÍTULO I: DETERMINACIÓN DE LA RETENCIÓN DE FÓSFORO EN EL SUELO MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE ISOTERMAS DE LANGMUIR.	
RESUMEN	2
ABSTRACT	3
INTRODUCCIÓN	4
OBJETIVOS	6
I. REVISIÓN DE LITERATURA	7
1. NATURALEZA DEL FÓSFORO EN EL SUELO	7
2. FRACCIONES DEL FÓSFORO EN EL SUELO	8
3. MECANISMOS DE RETENCIÓN DE FÓSFORO EL SUELO	9
4. PRINCIPIOS GENERALES DE PRECIPITACIÓN Y ADSORCIÓN DE FÓSFORO	10
5. ISOTERMAS DE ADSORCIÓN- MODELO LANGMUIR	12
6. ÍNDICE DE RETENCIÓN DE FÓSFORO	13
II. MATERIALES Y MÉTODOS	15
1. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	15
2. MUESTREO EN CAMPO	17
3. ANÁLISIS DE LABORATORIO	19
III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	22
IV. CONCLUSIONES	29
V. BIBLIOGRAFÍA	30

CAPÍTULO 2: EFECTO DE LA RETENCIÓN DE FÓSFORO EN EL SUELO SOBRE LA FERTILIZACIÓN FOSFATADA DEL CULTIVO DE MAÍZ.

RESUMEN	34
ABSTRACT	35
OBJETIVO E HIPÓTESIS	38
Objetivo.....	38
Hipótesis	38
I. REVISIÓN DE LITERATURA.....	39
1. FÓSFORO EN LOS SUELOS DEL TRÓPICO.....	39
2. IMPORTANCIA DEL FÓSFORO EN EL DESARROLLO DEL CULTIVO DEL MAÍZ.	40
3. FERTILIZACIÓN FOSFATADA.....	41
4. NIVEL CRÍTICO DE FÓSFORO PARA EL CULTIVO DE MAÍZ.....	41
II. MATERIALES Y MÉTODOS	44
1. LOCALIZACIÓN.....	44
2. DISEÑO EXPERIMENTAL	45
3. MANEJO AGRONÓMICO.....	46
4. VARIABLES EVALUADAS.....	47
5. ANÁLISIS DE LABORATORIO	49
III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	52
IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	57
1. CONCLUSIONES	57
2. RECOMENDACIONES.....	57
V. BIBLIOGRAFIA.....	58
ANEXO	

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro I.	Órdenes y zonas agroecológicas de los suelos en estudio en la provincia de Los Santos.....	16
Cuadro II.	Contenido de nutrientes de los suelos ¹	18
Cuadro III.	Características físico-químicas de los suelos ¹	19
Cuadro IV.	Adsorción de P. Coeficientes derivados de la isoterma de Langmuir para las localidades del sur.	22
Cuadro V.	Adsorción de P. Coeficientes derivados de la isoterma de Langmuir para las localidades del norte.	25
Cuadro VI.	Dosis de P recomendadas por el método del índice de retención de P(IRP) vs recomendaciones del laboratorio de suelos del IDIAP.....	28
Cuadro VII.	Tratamientos evaluados en el experimento. Los Santos, 2016.....	46
Cuadro VIII.	Cuadrados medios del análisis de regresión cuadrática para la variable P en el follaje.....	52
Cuadro IX.	Cuadrados medios del análisis de varianza para las variables de rendimiento de grano y otras características agronómicas para determinar el efecto de la fertilización fosfatada en el maíz.....	53
Cuadro X.	Promedios de las diferentes variables por localidad y tratamiento.....	54

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización geográfica de las localidades de estudio en la provincia de Los Santos.	16
Figura 2. Toma de las muestras de suelo	18
Figura 3. Proceso de preparación de las muestras, soluciones y centrifugado para la realización de las isotermas.....	20
Figura 4. Isotermas de Langmuir para los suelos de las localidades del sur: Los Destiladeros (A), Pedasí (B), Nuevo Ocu (C), San José (D).....	23
Figura 5. Isotermas de Langmuir para los suelos de las localidades del norte: Guararé (E), El Ejido (F), Llano Abajo (G) y La Colorada (H).	24
Figura 6. Adsorción máxima de P(mgkg ⁻¹) y Contante de energía(K) por localidad.	26
Figura 7. Adsorción Max. P (mgkg ⁻¹) vs Dosis para elevar el P 1mg l ⁻¹	28
Figura 8. Localidades seleccionadas en la provincia de Los Santos.	45
Figura 9. Establecimiento de ensayos de evaluación del índice de retención de P	47
Figura 10. Cosecha de ensayos por localidad. Los Santos 2017.	49
Figura 11. Mineralización de las muestras vía húmeda y determinación de P	50

**CAPÍTULO I: DETERMINACIÓN DE LA RETENCIÓN DE
FÓSFORO EN EL SUELO MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE
ISOTERMAS DE LANGMUIR**

DETERMINACIÓN DE LA RETENCIÓN DE FÓSFORO EN EL SUELO MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE ISOTERMAS DE LANGMUIR

RESUMEN

Los bajos niveles en el contenido de fósforo disponible que caracteriza nuestros suelos, son corregidos con aplicaciones de fertilizantes fosfatados, pero un porcentaje de este fósforo aplicado queda fijado o bloqueado en la fase sólida del suelo. Este experimento, se realizó con el objetivo de determinar el índice de retención de fósforo que permita estimar la dosis equivalente de fertilizante que se debe aplicar para alcanzar la concentración de fósforo óptima para el cultivo de maíz en suelos alfisoles e inceptisoles de la región de Azuero. Se tomaron muestras de suelos de ocho localidades de la región maicera de la provincia de Los Santos. A cada muestra, se le realizó una caracterización físico-química completa y además se elaboró la isoterma de Langmuir. Se calculó la capacidad de adsorción máxima de cada muestra de suelo para retener fosfatos (cantidad), fosfatos solubles en la solución del suelo (intensidad), y la propiedad que posee un suelo para resistir los cambios en la concentración de fósforo en solución o energía de retención (capacidad). El suelo inceptisol de la localidad Guararé, adsorbió la mayor cantidad de fósforo con 943.13 mgkg^{-1} seguida por el suelo alfisol de Pedasí y el inceptisol de San José, con valores de 794.70 y 788.27 mgkg^{-1} respectivamente. Las localidades con mayor contenido de arcilla mostraron una tendencia a absorber una mayor cantidad de fósforo que las localidades con textura arenosa. Los suelos inceptisoles de las localidades de Guararé, San José, y los alfisoles de El Ejido y Pedasí, presentaron mayores niveles de energía de retención con valores de 1.85; 1.75; 0.59 y 0.46 respectivamente. Las dosis equivalentes de fósforo más altas, para alcanzar la concentración óptima de fósforo en suelo para el cultivo de maíz, se presentaron en el suelo inceptisol de Llano Abajo, siendo de 202.8 kgPha^{-1} .

Palabras claves: Fósforo disponible, intensidad, cantidad, capacidad, dosis equivalente.

DETERMINATION OF SOIL PHOSPHORUS RETENTION THROUGH THE USE OF LANGMUIR ISOTHERMS

ABSTRACT

Low levels of available phosphorus content that characterizes some soils are corrected with applications of phosphate fertilizers, but a percentage of this applied phosphorus is fixed or blocked in the solid phase of the soil. The objective of this trial was to determinate phosphorus retention index that allows to estimate the equivalent dose of fertilizer that should be applied to reach the optimum phosphorus concentration for the corn cultivation in alfisols and inceptisols soils of the Azuero region. Soil samples were taken from eight localities in the corn region of the province of Los Santos. A complete physical-chemical characterization and Langmuir isotherm was made for each sample. Maximum adsorption capacity of each soil sample was calculated to retain phosphates (amount), soluble phosphates in soil solution (intensity) and property of soil to resist changes in the concentration of phosphorus in solution or energy retention (capacity). Inceptisol soil of Guararé locality adsorbed the highest amount of phosphorus ($943.13 \text{ mg kg}^{-1}$) followed by alfisol soil of Pedasi and inceptisol of San José, with values of 794.70 and 788.27 mg kg^{-1} respectively. Locations with higher clay content showed a tendency to absorb a higher amount of phosphorus than localities with sandy texture. Inceptisol soils of Guararé, San José and alfisols of El Ejido and Pedasí showed higher levels of retention energy with values of 1.85; 1.75; 0.59 and 0.46 respectively. The highest equivalent doses of phosphorus to reach the optimum concentration of phosphorus in soil for corn cultivation was found in the inceptisol soil of Llano Abajo, being $202.8 \text{ kgP ha}^{-1}$.

KEYWORDS: Available phosphorus, intensity, quantity, capacity, equivalent dose.

INTRODUCCIÓN

El fósforo (P), es uno de los nutrientes principales para las plantas, siendo necesario su adecuado suministro por parte de los suelos para condiciones no limitantes del crecimiento vegetal (Hernández y Zamalvide 1998). Sin embargo, es uno de los elementos más críticos para la producción agropecuaria, debido a su relativa escasez edáfica, la elevada retención por parte de la matriz del suelo, la falta de reposición natural y la progresiva escasez de sus fuentes naturales (Rubio 2002).

La absorción de P, por la planta puede limitarse por la fijación físico-química a la que está sujeto por los minerales del suelo, que hacen insolubles en agua y soluciones ácidas diluidas a las especies fosfatadas (García 2001). En el caso del P inorgánico (Pi) se presenta generalmente fuertemente fijado en forma de fosfatos de calcio (Ca^{2+}), hierro (Fe^{2+}), magnesio (Mg^{2+}) y aluminio (Al^{3+}), especialmente en arcillas del grupo de las caolinitas y ocluido en los óxidos de hierro y aluminio. Incluso el P aplicado como fertilizante en forma de superfosfato, puede fácilmente constituir compuestos inorgánicos inutilizables, debido a su inmovilización sobre la materia orgánica y arcillas (Cerón *et al.* 2012).

Estudios realizados en el Instituto de Investigación Agropecuaria de Panamá (IDIAP), indican que la mayoría de los suelos en Panamá tienen niveles bajos de P disponible y se espera que den una respuesta positiva a la aplicación de este elemento (Gordon *et al.* 1995; Villarreal *et al.* 2013; Villarreal *et al.* 2015). Estas respuestas pueden ser mayores si se logra determinar la cantidad de fertilizante fosforado que queda retenido por el suelo en forma no disponible para las plantas en una aplicación.

La utilización de las isothermas de Langmuir, permite una mejor descripción de las relaciones del P en solución y P absorbido en la fase sólida a concentraciones bajas de solución. La máxima capacidad de retención se observa en los andisoles de México, que pueden adsorber más de 1000 mgkg⁻¹ de P. En el rango medio a alto se encuentran los oxisoles de Brasil, mientras que los suelos de Argentina, poseen baja a muy baja capacidad de fijación de P, siendo la adsorción máxima inferior a 50 mgkg⁻¹ (Quintero 2002).

OBJETIVOS

- Determinar el índice de retención de P, que permita estimar la dosis equivalente de fertilizante que se debe aplicar para alcanzar la concentración de P óptima para el cultivo de maíz, en suelos alfisoles e inceptisoles de la región de Azuero.
- Definir mediante la utilización de Isotermas de Langmuir, la capacidad máxima de adsorción de P, el P en equilibrio en la solución y la constante de energía de retención (K) de P en suelos alfisoles e inceptisoles de la región de Azuero.
- Establecer dosis del nutrimento P para el cultivo de maíz basadas en el índice de retención de P, en suelos alfisoles e inceptisoles de la región de Azuero.

I. REVISIÓN DE LITERATURA

1. NATURALEZA DEL FÓSFORO EN EL SUELO.

El P, es un elemento que posee una actividad química muy alta y se encuentra en la naturaleza en más de 170 compuestos minerales que varían mucho en cuanto a su solubilidad. En consecuencia, el P es de los menos móviles y con más problemas de biodisponibilidad de todos los macronutrientes. Esta característica le da una alta resistencia a ser lixiviado en la mayoría de los suelos, pero al mismo tiempo causa deficiencias nutricionales ampliamente distribuidas en la producción agrícola (Holford 1997).

Proviene de las apatitas y depósitos de fosfato natural de donde es liberado a través de procesos de meteorización, lixiviación, erosión y extracción industrial como fertilizante. Entre el 20 y 60 % del P total del suelo corresponde a la fracción orgánica. Cuanto mayor es la cantidad de materia orgánica de los suelos, mayor es la acumulación y mineralización de las formas orgánicas, las cuales pueden incrementar el suministro de este nutriente a las plantas. El fósforo inorgánico (Pi), se presenta generalmente fuertemente fijado en forma de fosfatos de Ca^{2+} , Fe^{2+} , Mg^{2+} y Al^{3+} , especialmente en arcillas del grupo de las caolinitas

y ocluido en los óxidos de hierro y aluminio. Incluso el P aplicado como fertilizante en forma de superfosfato, puede fácilmente constituir compuestos inorgánicos inutilizables, debido a su inmovilización sobre la materia orgánica y arcillas (Cerón y Aristizábal 2012).

La disponibilidad de P en el suelo corresponde a una pequeña fracción del total contenido en el mismo, reflejando parte del P de la solución y aquella que se encuentra en la fase sólida susceptible de ser asimilada por las plantas. El P forma compuestos debilmente solubles con cationes divalentes y monovalentes por esta razón, la cantidad de P en solución es pequeña (Rojas 2015; Holford 1997).

2. FRACCIONES DEL FÓSFORO EN EL SUELO

Según Vargas (2012), el P en el suelo es funcional en las siguientes fracciones:

a. **La fracción en solución:** son las formas aprovechables para las plantas en forma inmediata, es decir son fosfatos en la solución del suelo. Su concentración es muy débil y fluctúa entre 0.2 y 0.5 mglt⁻¹ o sea 200 a 400 grha⁻¹ en 30 centímetros de espesor. En suelos muy ricos la concentración puede llegar hasta 1mglt⁻¹ y en suelos pobres a 0.1 mglt⁻¹. Generalmente, es una concentración constante y permanece así, aunque varíe la relación suelo-agua. Para que los cultivos se abastezcan convenientemente es necesario que ocurra una renovación del P en solución.

b. **La fracción lábil:** representa la cantidad de P que puede pasar a la solución en una temporada de cultivo. Su disponibilidad es más lenta que la del P en solución y muy dependiente del pH. Representan del 15 al 30% del Pi, lo que significa 800 a 2500 kg P₂O₅/ha. Puede estar adsorbido directamente por los bordes de las arcillas (cuando estas

tienen cargas positivas como la caolinita a bajos valores de pH), o por uniones que usan al calcio como puente (en las arcillas de tipo 2:1) así como también por los óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio, que tienen un poder de fijación mucho mayor que el de las arcillas.

c. **La fracción no lábil:** representa todos aquellos compuestos fosforados que no pasan a formar parte de la solución del suelo en la temporada del cultivo. La insolubilización se puede deber a la precipitación como fosfatos cálcicos en medio alcalino, o como fosfatos de hierro y aluminio en medio ácido. Tanto en suelos ácidos como alcalinos el P tiende a sufrir una cadena de reacciones que producen compuestos fosforados de baja solubilidad. Por lo tanto, durante el largo tiempo que el P permanece en el suelo, las formas menos solubles y por ende las menos disponibles para la planta tienden a aumentar (Castillo 2015).

3. MECANISMOS DE RETENCIÓN DE FÓSFORO EL SUELO

Estudios realizados por Torrent *et al.* (1992), indican que los mecanismos de retención de ortofosfato por la fase sólida del suelo son reacciones de adsorción/precipitación que incluyen:

- a. Adsorción no específica (o de esfera externa) que es debida mayormente a interacciones electroestáticas.
- b. Adsorción aniónica específica por cambio de ligando (o de esfera interna con formación de complejos de superficie mono- o bidentados).
- c. Precipitación sobre la superficie adsorbente.

d. Precipitación mayoritariamente en forma de fosfatos poco cristalinos de Fe, Al, Ca y otros elementos.

4. PRINCIPIOS GENERALES DE PRECIPITACIÓN Y ADSORCIÓN DE FÓSFORO

En suelos ácidos o calcáreos, el P se precipita como fosfato de hierro, aluminio o calcio. La máxima precipitación de fosfatos de hierro se encuentra entre pH 2.5 a 3.5, mientras que para fosfato de aluminio entre 3.5 y 4.0. En estos pH, predomina la forma monovalente (H_2PO_4), lo que puede indicar que es el ion fosfato que forma los combinados de P al reaccionar químicamente (Violante *et al.* 2002). En suelos alcalinos (pH mayor de 7.5) el P se precipita formando compuestos insolubles como el fosfato tricálcico.

La adsorción, es el proceso mediante el cual las sustancias químicas reactivas se unen a las superficies de los sólidos. Las partículas pequeñas como los minerales de arcilla, poseen una gran superficie específica por lo que físicamente tienden a tener una alta capacidad de adsorción. Estos procesos físicos, muchas veces están acompañados de reacciones químicas, que provocan la precipitación del P de la solución del suelo en compuestos con distinto grado de solubilidad, conocidos como procesos de quimio-adsorción (Silva 2011).

A medida que el P es adsorbido, se observan relaciones no lineales entre las cantidades retenidas y presentes en solución, las uniones que se producen con las superficies sólidas poseen distintos niveles de energía, la cual disminuye a medida que se van ocupando los distintos sitios de adsorción. Esta no linealidad se representa matemáticamente por una

serie de ecuaciones alternativas (isotermas) con transformaciones logarítmicas o de otro tipo para hacer aproximaciones lineales. Durante la adsorción de P se produce una combinación de varios mecanismos dependientes del tiempo de contacto, algunos ocurren en forma casi instantánea, mientras que otros son más lentos y pueden llevar al P al interior de las partículas resultando en compuestos de menor disponibilidad. (McGechan *et al.* 2002).

Según la reacción y el tipo de producto resultante, el P va a constituir diferentes compartimentos de acuerdo con su solubilidad o “pooles”, los cuales incluyen al P orgánico (Po) en solución, adsorbido rápidamente en sitios superficiales, adsorbido o depositado por procesos más lentos, y diversas formas de P precipitado. La cantidad de P en cada pool, en un momento dado depende de la historia de fertilización fosfatada y del tiempo transcurrido desde la aplicación del fertilizante (Hartikainen 1991).

La adsorción del anión fosfato se caracteriza también, por la selectividad de las superficies adsorbentes y por estar influenciada por los factores que condicionan el desarrollo de las cargas eléctricas positivas (Barrow 1999). Elevados valores de pH, baja superficie específica de los minerales de arcilla y baja concentración de fosfato en disolución conducen a una baja adsorción (Lin *et al.* 1983).

Los complejos húmicos con átomos de Fe y Al, poseen capacidad para retener el fosfato a través de reacciones de adsorción por cambio de ligando entre los iones fosfato y los grupos hidroxilo (Gerke y Hermann 1992).

5. ISOTERMAS DE ADSORCIÓN- MODELO LANGMUIR

Fue el primer modelo que se propuso, supone que la adsorción máxima corresponde a una monocapa saturada de moléculas de adsorbato, no pudiendo migrar las moléculas adsorbidas a través de la superficie del adsorbente. Asimismo, supone que las moléculas se adsorben en lugares definidos en la superficie y que la energía de adsorción es constante (superficie homogénea). Aunque, la ecuación de Langmuir fue originalmente derivada a partir de consideraciones cinéticas, posteriormente, se dedujo a partir de consideraciones de tipo termodinámico y de mecánica estadística (García 2014).

La isoterma de Langmuir, se aplica a concentraciones bajas de P en equilibrio y a una temperatura constante. Permite calcular la capacidad de adsorción máxima de cada muestra de suelo para retener fosfatos, así como también los fosfatos en la solución del suelo (factor **Intensidad**), la cantidad de P que está en la fase sólida o fracción lábil, en equilibrio con la solución (factor **Cantidad**) y la relación dinámica entre la cantidad y la intensidad que es conocida como el factor **Capacidad (K)** o capacidad buffer. La Capacidad buffer o amortiguadora es la propiedad que posee un suelo para resistir los cambios en la concentración de P en solución en estado de equilibrio al extraer o agregar P. (Instituto Geográfico Agustín Codazzi 2000).

Sposito 1982, estableció que la expresión lineal de la isoterma de Langmuir es:

$$\frac{C}{x/m} = \frac{1}{K \cdot b} \times \frac{C}{b}$$

Donde:

C= concentración del P en la solución de equilibrio en mgkg^{-1} .

x/m = cantidad de P adsorbido por unidad de peso. mg de P/g de suelo.

b = adsorción máxima.

K = Intersección

b = pendiente

K = constante relacionada con la energía de retención de P.

La utilización de las isothermas de Langmuir, permite una mejor descripción de las relaciones del P en solución y el P absorbido en la fase sólida a concentraciones bajas de solución. La máxima capacidad de retención se observa en los suelos andisoles de México, que pueden adsorber más de 1000 mgPkg⁻¹. En el rango medio a alto se encuentran los oxisoles de Brasil, que presentan menor constante de energía de retención, esto les permite suplir suficiente P requerido por la planta a una menor saturación de fosfato. A diferencia de los andisoles, que presentaron elevada retención de P, predominan arcillas del tipo amorfas que retienen con más fuerza el nutriente (Quintero 2002). Resultados similares fueron encontrados por Villarreal (2012) en suelos ultisoles y alfisoles de Panamá.

El índice de retención de P, en los suelos tiene un alto poder predictivo del proceso de retención de P agregado en corto plazo y la pérdida de eficiencia de uso por la planta (Hernández y Zamalvide 1998).

6. ÍNDICE DE RETENCIÓN DE FÓSFORO

El Índice de Retención de P es una medida práctica y sencilla, que ha mostrado ser representativa y descriptiva del poder buffer de un suelo. La capacidad buffer de P o poder amortiguador del suelo tiene un efecto directo sobre la cantidad de fertilizante que pasará

a formas no disponibles para las plantas. En suelos de media a alta capacidad buffer como los suelos rojos de Misiones o Norte de Corrientes en Argentina, un 70% del P adicionado, puede pasar rápidamente a formas no lábiles y poco disponibles. Suelos franco-limosos a franco arcillosos, tienen baja capacidad de retención, quedando un 40 a 50% del P aplicado fácilmente disponible para las plantas. Mientras que, en los suelos de texturas gruesas solo del 30 a 40% pasa a formas no lábiles (Quintero *et al.* 1999).

La Capacidad “buffer” o amortiguadora es la propiedad que posee un suelo para resistir los cambios en la concentración de P en solución, en estado de equilibrio al extraer o agregar P. Un suelo de alta capacidad amortiguadora repondrá rápidamente el P agotado de su solución por las plantas. Por otro lado, en suelos con diferente capacidad amortiguadora se requieren distintas cantidades de fertilizante para alcanzar un mismo nivel de P en solución (Prabhakaran 1996).

II. MATERIALES Y MÉTODOS

1. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Este estudio, se desarrolló en la región maicera de Azuero, con especial énfasis en la provincia de Los Santos, (Figura 1). Para la selección de las áreas de muestreo de suelo se tomaron en cuenta los siguientes criterios:

- a. La textura, la cual determina en gran medida la capacidad buffer de P o poder amortiguador del suelo.
- b. El nivel de precipitación de la zona, los cuales son inferiores a la media de los últimos 19 años en la zona de Guararé, Los Santos y Parita, mientras que Las Tablas, Pocrí y Pedasí, presentan niveles de precipitación superiores a la media (Gordon 2014).
- c. La dedicación al cultivo de maíz por un periodo mínimo de 10 años lo que permite verificar el impacto de la actividad en la disponibilidad de P en el suelo.

Los suelos en estudio pertenecen a los órdenes alfisol e inceptisol y a las zonas de vida bosque húmedo premontano, bosque seco tropical y bosque seco premontano (Cuadro I).

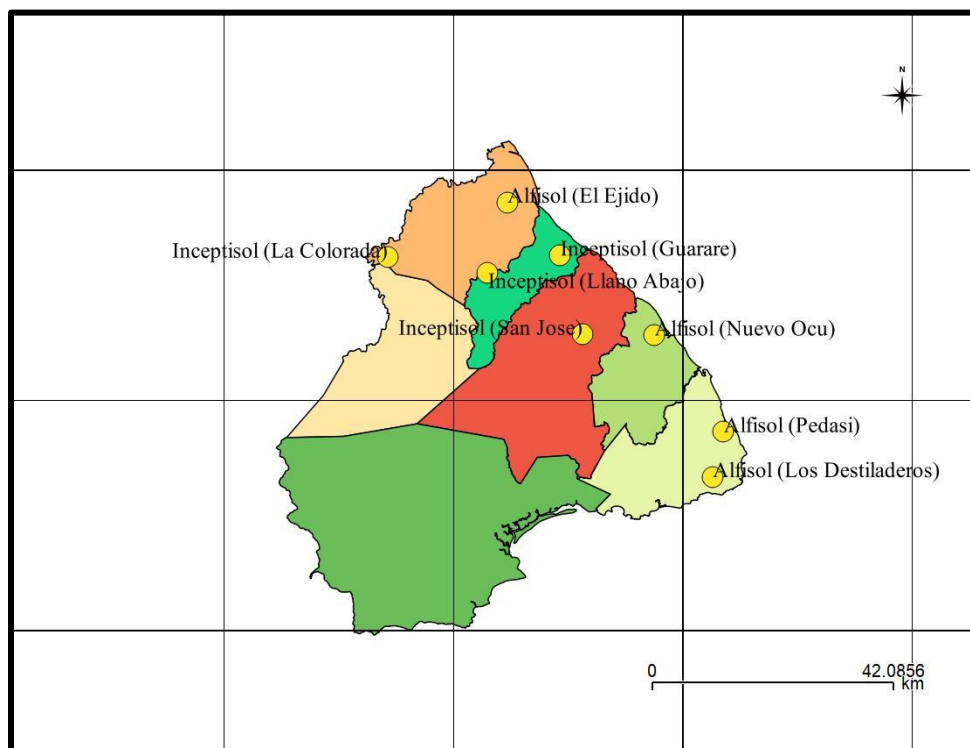


Figura 1. Localización geográfica de las localidades de estudio en la provincia de Los Santos.

Cuadro I. Órdenes y zonas agroecológicas de los suelos en estudio en la provincia de Los Santos.

Orden de suelo ¹	Localidad	Latitud (Norte)	Longitud (Oeste)	Zonas de vida ²
Localidades Sur de la Península				
Alfisol	Los Destiladeros	7°28'38.79"	80°02'46.37"	Bosque húmedo premontano
Alfisol	Pedasí	7°32'53.04"	80°01'43.09"	Bosque seco tropical
Alfisol	Nuevo Ocu	7°42'01.22"	80°08'15.75"	Bosque seco tropical
Inceptisol	San José	7°42'05.57"	80°15'06.15"	Bosque seco tropical
Localidades Norte de la Península				
Inceptisol	Guararé	7°49'34.13"	80°17'12.01"	Bosque seco premontano
Inceptisol	Llano Abajo	7°47'56.93"	80°24'04.57"	Bosque seco tropical
Inceptisol	La Colorada	7°49'23.51"	80°33'35.28"	Bosque seco tropical
Alfisol	El Ejido	7°54'34.20"	80°22'12.24"	Bosque seco premontano

¹ Villarreal *et al.* (2017)

² Holdridge (1967).

2. MUESTREO EN CAMPO

De cada localidad se tomaron cuatro muestras, a una profundidad de 20cm (capa arable) (Figura 2). A cada una se le realizó un análisis de caracterización físico-químico completo de acuerdo con la metodología descrita por Villarreal y Name (1996).

De acuerdo a los índices de niveles críticos de nutrientes establecidos en el laboratorio de suelos del IDIAP (Name y Cordero 1987), todas las localidades presentaron niveles bajos de P, K de medio a bajo, Ca y Mg en niveles altos, Mn de medio a alto, Zn y Cu de medio a bajo (Cuadro II). En cuanto a las características físico-químicas (Cuadro III), los suelos de las localidades de Los Destiladeros, Pedasí, La Colorada y Llano Abajo presentaron mayores contenidos de arena, mientras que en el resto de los suelos hubo una mayor presencia de arcilla.

El pH presentó valores entre poco ácido a muy ácido, la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE), fue alta para los suelos de Llano Abajo y Guararé, media para Nuevo Océ, El Ejido y San José y baja para La Colorada, Los Destiladeros y Pedasí. El porcentaje de saturación de aluminio y el contenido de materia orgánica fue bajo para todas las localidades.



Figura 2. Toma de muestras de suelo.

Cuadro II. Contenido de nutrientes de los suelos¹

Localidad	P	K	Ca	Mg	Al	Mn	Fe	Zn	Cu
	mg l ⁻¹		cmol(+)kg ⁻¹			mg l ⁻¹			
Los Destiladeros	2.00	145.50	9.80	3.70	0.10	59.60	23.80	2.20	1.10
Pedasí	12.00	63.10	5.40	2.20	0.10	17.30	8.90	2.30	0.40
Nuevo Ocu	7.00	50.00	13.10	22.20	0.10	48.20	13.40	1.10	1.20
San José	3.00	95.10	15.00	12.30	0.57	51.10	12.80	3.10	2.10
Guararé	2.00	116.30	14.70	76.10	0.10	70.60	16.40	0.90	3.20
Llano Abajo	1.00	60.20	28.50	18.10	0.10	46.30	10.60	0.40	1.30
La Colorada	2.00	96.80	7.30	6.60	0.10	82.30	19.30	2.10	4.00
El Ejido	1.00	24.30	10.30	11.90	0.10	1.86	41.10	7.10	0.40

¹ IDIAP (2015)

Cuadro III. Características físico-químicas de los suelos¹.

Localidad	Textura	% Arcilla	Color	CICE	pH	Al	M.O
				cmol(+) kg ⁻¹		% Sat.	%
Los Destiladeros	ARE-FRA	16	P.Amarillento	13.97	5.20	0.72	0.00
Pedasí	ARE	12	P.Amarillento	7.86	6.60	1.27	0.00
Nuevo Ocú	FRA-ARC-ARE	22	P.Amarillo oscuro	35.53	4.90	0.28	0.66
San José	FRA-ARC-ARE	24	P. Oscuro	28.11	4.70	2.03	0.57
Guararé	FRA-ARC	36	P.Oscuro	91.20	5.70	0.11	0.13
Llano Abajo	FRA	22	P. Amarillo claro	46.85	5.90	0.21	0.00
La Colorada	FRA-ARE	16	P. Amarillento	14.25	4.90	0.70	0.13
El Ejido	ARC	36	P. Amarillento	22.36	5.00	0.45	1.86

¹Laboratorio de suelos, IDIAP 2015

3. ANÁLISIS DE LABORATORIO

Las muestras de suelo fueron secadas, molidas y se pasaron por un tamiz N°20 (2mm de abertura en la malla). Para la realización de las isoterma de Langmuir, se utilizó la metodología descrita por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (2000). Se pesaron 3 g de suelo a los cuales se les agregó 30 ml de solución de P, en concentraciones variables. Se aplicaron seis concentraciones diferentes de P por cada muestra, a saber 5; 10; 25; 50; 75 y 100 mg l⁻¹, preparadas a partir de un patrón de P en cloruro de calcio 0.01 M; agitados por 16 horas y centrifugados durante 30 minutos (Figura 3). En el decantado se determinó el contenido de P, utilizando un espectrofotómetro de luz visible, siguiendo la metodología de la formación del complejo Fosfo-molibdico (Villarreal y Name 1996). La diferencia entre la cantidad agregada y la que queda en la solución del suelo es el P fijado. Esta metodología brinda información sobre la concentración del P remanente en la solución del suelo (factor de intensidad), que está en equilibrio con el P de la fase sólida (factor de capacidad). A partir de

este principio, fueron elaboradas las isotermas de adsorción para cada una de las muestras estudiadas, determinándose luego la constante de adsorción máxima de P en cada caso.



Figura 3. Proceso de preparación de las muestras, soluciones y centrifugado para la realización de las isotermas.

La determinación de la cantidad de P que se debe aplicar para elevar el P extraíble en el suelo se realizó utilizando incubaciones con una solución de Fosfato monobásico de potasio ($K(H_2PO_4)_2$) a dosis crecientes. Se utilizaron cinco dosis; 0; 8; 16; 32 y 67 mg de $P\text{kg}^{-1}$. Los suelos se fertilizaron homogéneamente y se colocaron protegidos del sol y a humedad de capacidad de campo por un periodo de 45 días. Luego se determinó el P extraíble utilizando la metodología de la formación del complejo fosfomolibdico (Villarreal y Name 1996). Se calculó para cada suelo el aumento en el P extraíble para cada dosis de P agregado como la diferencia del P extraíble de cada muestra con el P extraíble promedio de las dos muestras a las que no se les agregó P. El coeficiente b se ajustó para cada situación mediante el modelo lineal simple. Este coeficiente b es el incremento en el P extraíble en el suelo ante la adición de un mg de $P\text{kg}^{-1}$ en el suelo. Para determinar la dosis recomendada para elevar el P en $1\text{mgkg}^{-1}(\text{kg P fertilizanteHa}^{-1})$ se utilizó la siguiente formula:

$$\text{kgPha}^{-1} = 0.01 (\text{densidad aparente} \times \text{profundidad (cm)}) / \text{Coeficiente b}.$$

La dosis final recomendada para el cultivo se determinó de la siguiente manera:

$P \text{ extraíble del suelo} - \text{nivel crítico del cultivo} \times \text{dosis recomendada para elevar el P en } 1\text{mg/kg}$ (Rubio *et al.* 2015).

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las isothermas de adsorción (Figuras 4 y 5), muestran la misma tendencia, donde a medida que aumenta la concentración de P en equilibrio, aumenta la cantidad adsorbida del mismo hasta llegar a un punto en que se mantiene constante. Este comportamiento es típico de la isoterma de adsorción propuesta por Langmuir (Fox y Kamprath 1970). Los suelos de las localidades del sur, San José y Pedasí, mostraron una mayor capacidad de adsorción de P, seguidos por Los Destiladeros y Nuevo Océ respectivamente. El coeficiente de determinación de la ecuación de Langmuir en los suelos de las localidades de San José y Pedasí es alto comparado con los correspondientes a los de las localidades de Los Destiladeros y Nuevo Océ (Cuadro IV).

Cuadro IV. Adsorción de P. Coeficientes derivados de la isoterma de Langmuir para las localidades del sur.

Localidades del Sur	Ecuación Lineal de Langmuir	R ²	Parámetros de Langmuir	
			K	Ads. Max (mgkg ⁻¹)
Los Destiladeros	$y = 1.5075x + 9.0121$	0.60	0.03	663.35
Pedasí	$y = 1.2585x + 2.7135$	0.86	0.46	794.60
Nuevo Océ	$y = 1.8566x + 15.022$	0.57	0.12	538.62
San José	$y = 1.2286x + 0.7234$	0.96	1.75	788.27
Promedio			0.59	696.27

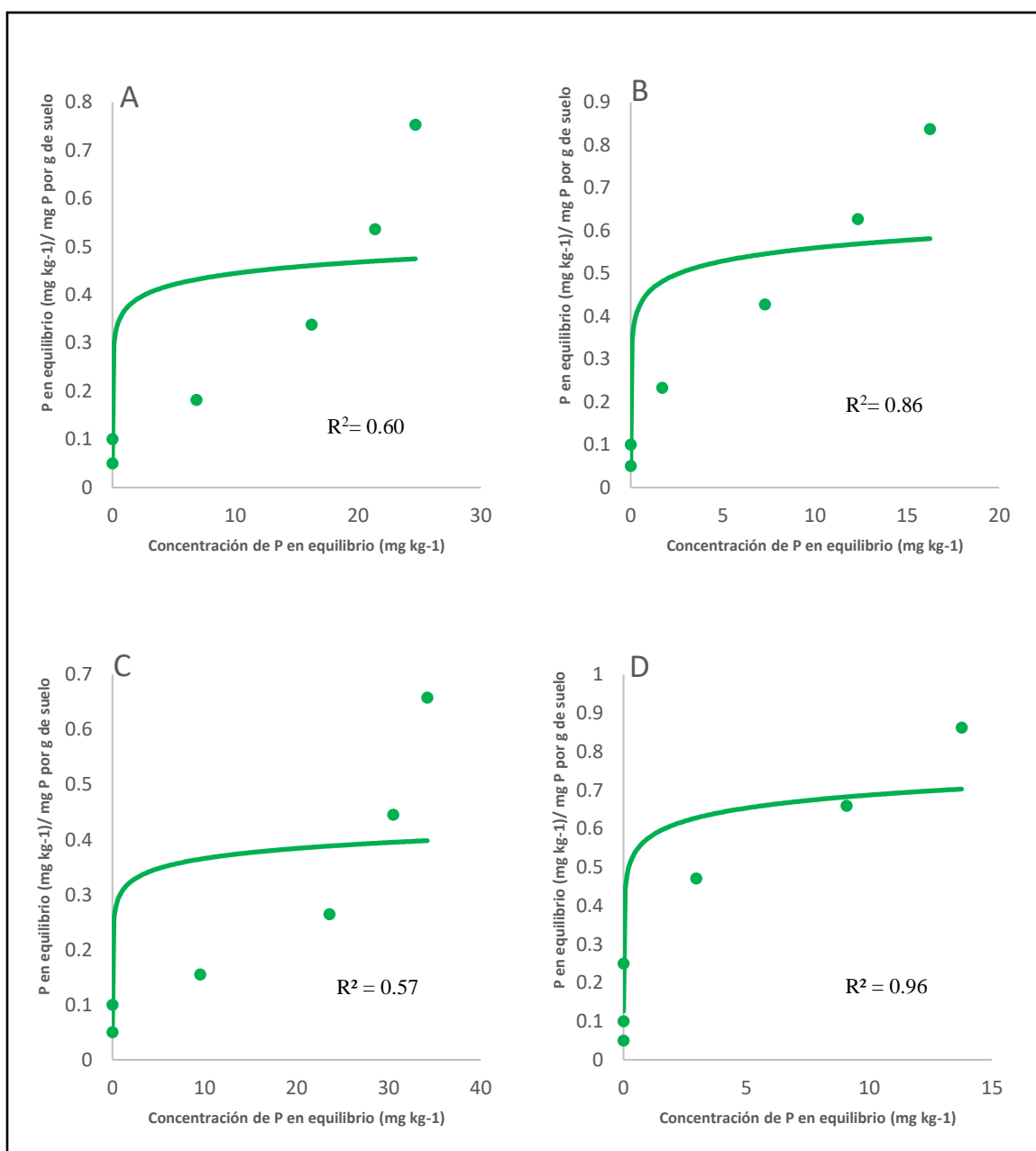


Figura 4. Isotermas de Langmuir para los suelos de las localidades del sur: Los Destiladeros (A), Pedasí (B), Nuevo Ocu (C), San José (D).

El suelo de la localidad de Pedasí, tuvo una adsorción máxima de P de 794.60 mgkg⁻¹, siendo la más alta de las localidades del sur. Seguido, por el suelo de la localidad de San José con 788.27 mgkg⁻¹, quien además, presentó el factor K más alto. Esta localidad a

través de los años ha mostrado una tendencia a reducciones en los valores de pH (Gordón, 2017). Lo cual puede explicar los altos valores de adsorción de P encontrados.

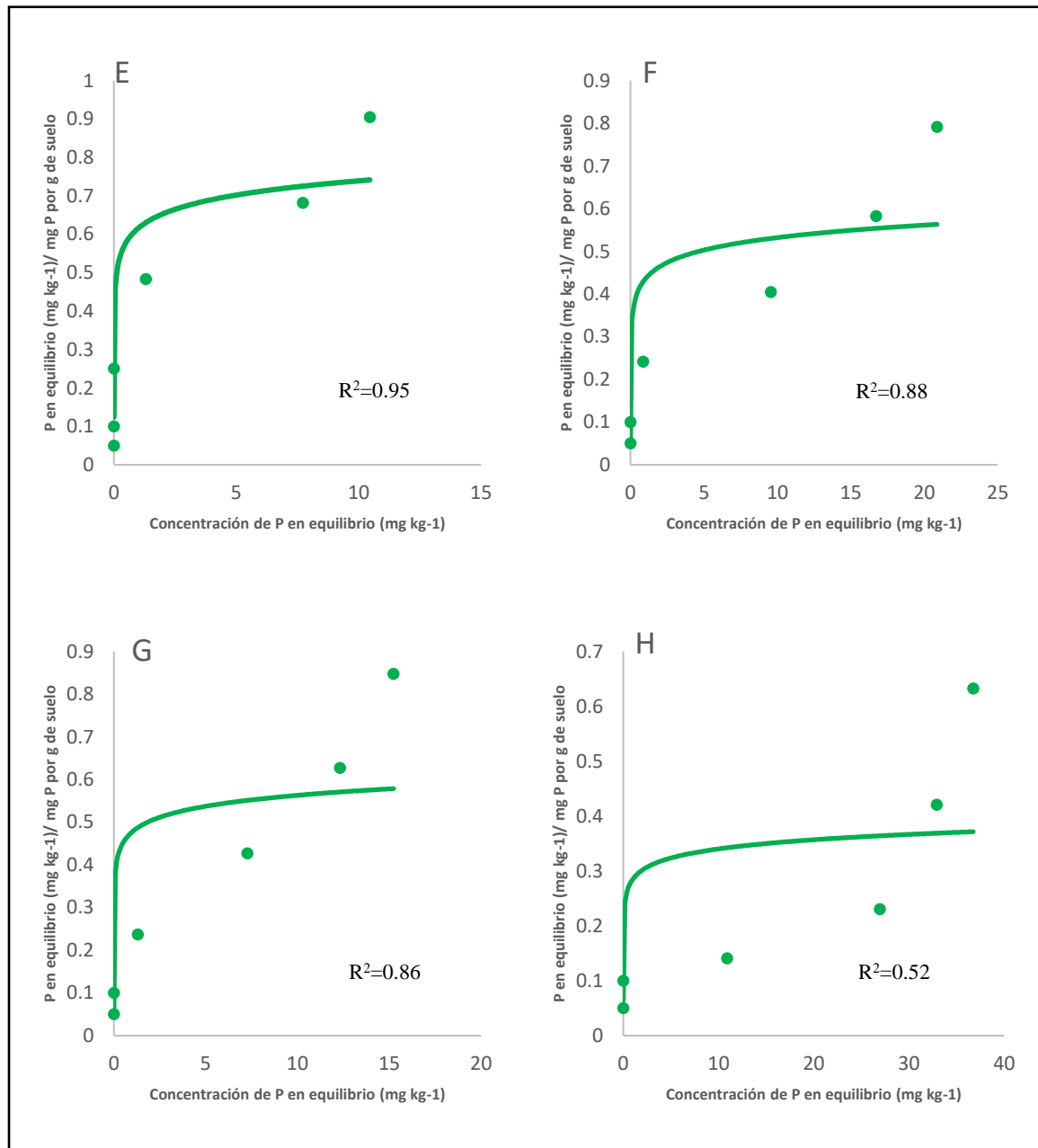


Figura 5. Isotermas de Langmuir para los suelos de las localidades del norte: Guararé (E), El Ejido (F), Llano Abajo (G) y La Colorada (H).

El suelo de la localidad de Nuevo Ocuí, presentó la adsorción máxima de P más baja con 538.62 mgkg^{-1} . Los Destiladeros, por su parte, fue la localidad del sur que presentó el suelo con el valor más bajo del factor K de 0.03, y una adsorción máxima de P de 663.35 mgkg^{-1} . El suelo de la localidad de La Colorada, presentó la capacidad más baja de adsorción de P de todas las localidades del norte. El resto de los suelos tuvieron capacidades de adsorciones de P similares (Cuadro V). La máxima adsorción de P en las localidades del norte estuvo encabezada por el suelo de la localidad de Guararé con 943.13 mgkg^{-1} . Seguido por los suelos de las localidades de Llano Abajo, El Ejido y La Colorada con valores de 775.67; 703.78 y 486.97 mgkg^{-1} , respectivamente. El factor K y el R^2 fueron más alto en el suelo de la localidad de Guararé. Por su parte el suelo de la localidad de La Colorada, presentó valores de R^2 de 0.52 y factor K de 0.11, siendo los más bajos de las localidades del norte.

Cuadro V. Adsorción de P. Coeficientes derivados de la isoterma de Langmuir para las localidades del norte.

Localidades del Norte	Ecuación Lineal de Langmuir	R^2	Parámetros de Langmuir	
			K	Ads. Max (mg kg^{-1})
Guararé	$y = 0.5731 + 1.0603x$	0.95	1.85	943.13
El Ejido	$y = 2.4114 + 1.4209x$	0.88	0.59	703.78
Llano Abajo	$y = 2.2702 + 1.2892x$	0.86	0.57	775.67
La Colorada	$y = 2.4114 + 1.4209x$	0.52	0.11	486.97
Promedio			0.78	727.32

Las pruebas de t a un significancia de 5%, realizadas para comparar las medias de adsorción máxima de P entre los ordenes de suelos (alfisol e inceptisol) y las zonas(norte y sur) mostraron que no hay diferencias significativas ($p = 0.53$ y 0.79 respectivamente).

En ambas zonas se observó, que los suelos con mayor contenido de arcilla mostraron una tendencia a adsorber una mayor cantidad de P. Resultados similares fueron encontrados por Carrasco *et al.* (1992) en suelos de regiones semiáridas de Chile. Sin embargo, el suelo de la localidad de Pedasí, presentó la adsorción de P más alta de las localidades del sur y los contenidos de arcillas más bajos. Esto indica la existencia de otros factores que influyen en las tasas de adsorción de P. La materia orgánica tiene un importante papel en la disponibilidad de P en el suelo, además de otras propiedades como, la alta acidez, presencia de alófanos y deficiencia de bases intercambiables influyen igualmente en la adsorción de P (Bravo *et al.* 2013). Partiendo de esta premisa, el suelo de la localidad de Pedasí, presentó valores bajos de materia orgánica y CICE, lo cual puede explicar su alta adsorción de P. La adsorción máxima P se correlacionó positivamente con la constante K con un $r=0.78$. Esto indica que entre más alta es la adsorción de P, mayor es la energía con la que es retenido (Figura 6).

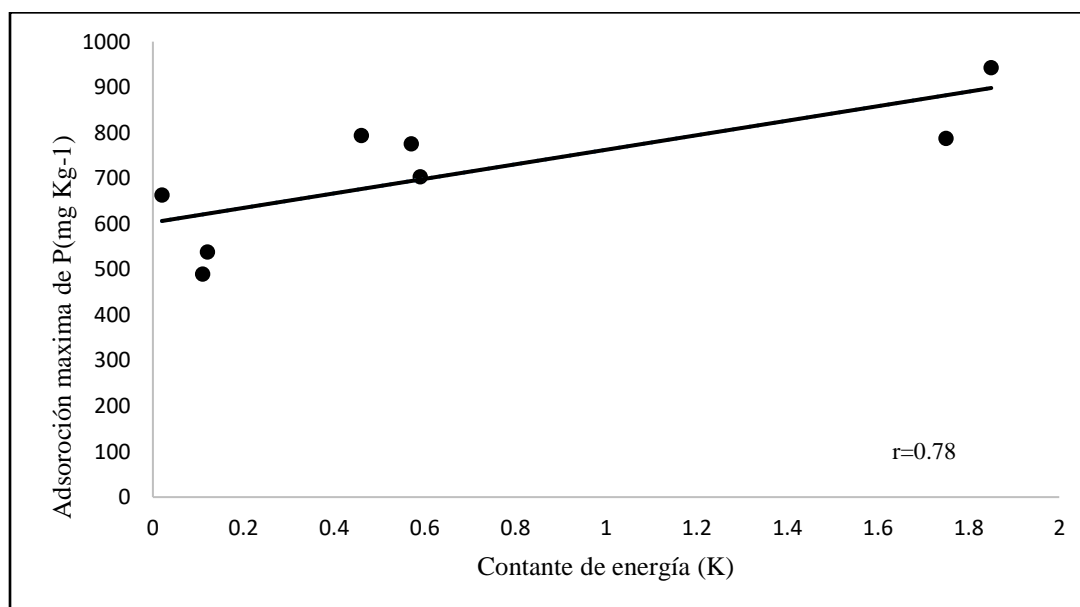


Figura 6. Adsorción máxima de P(mgkg⁻¹) y Contante de energía(K) por localidad.

En el Cuadro VI, se presentan las dosis de P por hectárea recomendadas en cada localidad para el cultivo de maíz. Las dosis más elevadas se obtuvieron para las localidades de Llano Abajo, San José, Guararé y Pedasí, respectivamente. Estas dosis garantizan que los requerimientos de P por el cultivo queden cubiertos, ya que, toman en cuenta aspectos como la cantidad P retenido por el suelo ante la aplicación del fertilizante. Además, evita realizar aplicaciones excesivas de P en suelos en donde no es necesario. Este es el caso de la localidad de Nuevo Océ, en donde la dosis recomendada de fósforo fue la más baja (8.3 kg ha^{-1}).

En el Laboratorio de Suelos del IDIAP, las recomendaciones de fertilizantes se basan en las exigencias del cultivo, eficiencia del fertilizante y las dosis aplicadas (Name y Villarreal 1996). Si se compara este método con las dosis determinadas con el índice de retención de P, se observan diferencias superiores al 90 por ciento. La dosis para elevar de $\text{P } 1 \text{ mg l}^{-1}$ se correlaciona positivamente con la adsorción máxima de P (mg kg^{-1}). Esto indica que el método utilizado para calcular la dosis de P, guarda relación con la adsorción máxima de P determinada por medio de la Isoterma de Langmuir (Figura 7).

Cuadro VI. Dosis de P recomendadas por el método del índice de retención de P (IRP) vs recomendaciones del laboratorio de suelos del IDIAP.

Lugar de Muestreo	Dosis para elevar el P 1mg l^{-1}	Dosis kg Pha^{-1} para Maíz	Dosis $\text{kg P}_2\text{O}_5\text{ha}^{-1}$ para Maíz	$\text{P}_2\text{O}_5\text{kg ha}^{-1}$ Laboratorio de Suelo. Idiap.	Diferencia Dosis IRP vs Dosis Laboratorio $\text{kg P}_2\text{O}_5\text{ha}^{-1}$
Los Destiladeros	9.36	109.57	251.04	58.93	493.358
Pedasí	17.71	149.75	343.1	58.93	695.89
Nuevo Ocu	4.88	8.39	19.23	58.93	-16.624
San José	13.69	170.23	390.02	58.93	799.114
Guararé	13.25	168	384.91	58.93	787.872
El Ejido	12.8	140.06	320.9	58.93	647.05
Llano Abajo	18.57	202.8	464.65	58.93	963.3
La Colorada	9.15	102.62	235.19	58.93	458.488

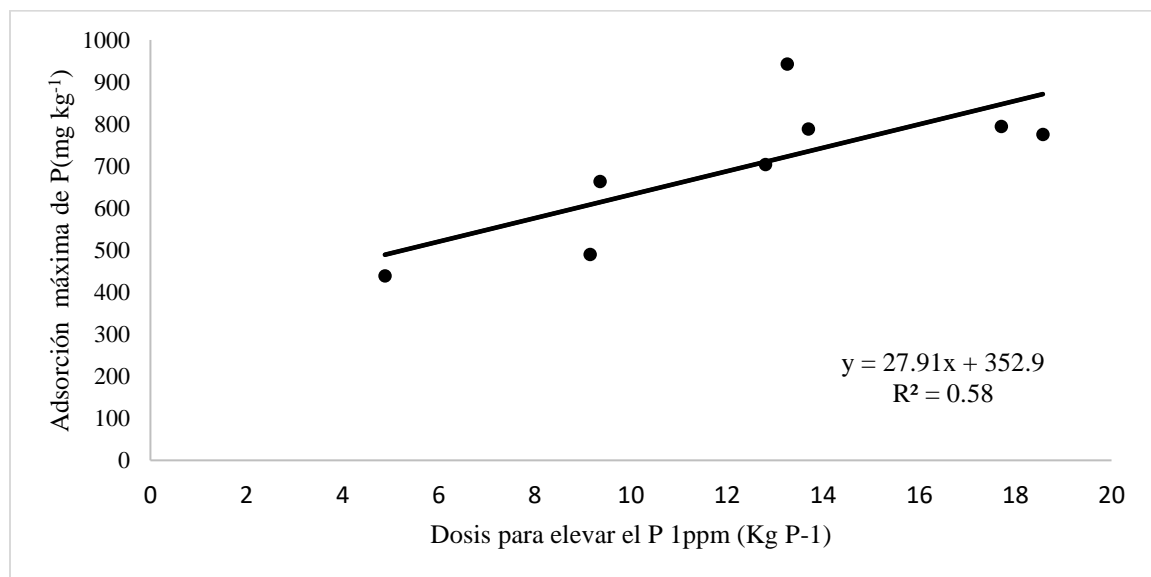


Figura 7. Adorción Max. P (mg kg^{-1}) vs Dosis para elevar el P 1mg l^{-1}

IV. CONCLUSIONES

- El contenido de arcillas tiene una gran influencia en el poder de retención de P en suelos tanto alfisoles como inceptisoles.
- Los suelos inceptisoles de las localidades del norte tiene una capacidad de adsorción de P y energía de retención promedio mayores que los suelos alfisoles e inceptisoles de las localidades del sur.
- Las dosis de P, calculadas tomando en cuenta el índice de retención de P en suelo son altas si las comparamos con métodos de recomendación utilizados por el Laboratorio de Suelo del IDIAP.

V. BIBLIOGRAFÍA

- BARROW N.J. 1999. The four laws of soil chemistry: the Leeper lecture 1998. Australian Journal of Soil Research 37:787-829.pp
- BRAVO, I; MONTOYA, J; MENJIVAR, J. 2013. Retención y disponibilidad de P asociado a la materia orgánica en un Typic Melanudands del departamento del Cauca, Colombia. Acta Agron., Volumen 62, Número 3, 261- 267 p.
- CARRASCO, M; OPAZO, J; PERALTA, I; VERA, L. 1992. Retención de P en suelos de zonas semiáridas. Agricultura Técnica. Chile. 411-415pp
- CASTILLO, B. 2015. Caracterización de las propiedades y fertilidad de los suelos del Cantón Marcabelí, provincia de El Oro. Tesis de grado. Universidad técnica de Machala. Ecuador.98p
- CERÓN, L; ARISTIZÁBAL, F. 2012. Dinámica del ciclo del nitrógeno y P en suelos. Instituto de Biotecnología Universidad Nacional de Colombia. 291 p
- FOX, R.L; KAMPRATH, E.J. 1970. Phosphate sorption isotherms for evaluating the phosphate requirements of soils. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 34:902-907pp.
- GARCÍA, F. 2001. Fertilización del maíz en la región pampeana. En: AIANBA, editores, Actas VII Congreso Nacional de Maíz. AIANBA 7 al 9 noviembre de 2001. Pergamino, Buenos Aires, ARG. 6 p.
- GARCÍA, N. 2014. Nueva generación de carbones activados de altas prestaciones para aplicaciones medioambientales. Tesis doctoral. Universidad De Oviedo. España. 217p.
- GORDON, R. 2014. Los granos básicos y la variabilidad climática en Azuero: Caso maíz. Conferencia. Primer congreso científico CRULS Universidad de Panamá. Las Tablas Panamá.

- GORDON, R. 2017. Base de datos de análisis de suelos. Programa de Maíz. Instituto de Investigación Agropecuaria de Panamá. Información sin publicar.
- GORDON, R; DE GRACIA, N; GONZÁLEZ, A; FRANCO, J; DE HERRERA, A. 1995. Respuesta del cultivo de maíz a la aplicación de P y Azufre, Panamá 1989-1992. Rev. Ciencias Agropecuarias. 8:193-214pp
- HERNÁNDEZ, J; Y ZAMALVIDE, J. 1998. Proceso de retención de P por los suelos evaluados a través de parámetros de suelo y planta. Uruguay. Agrociencia Volumen 1 N°2. 48-63 pp.
- HOLDRIDGE, LR. 1967. Sistema de clasificación de zonas de vida de Holdridge. Ecología basada en zonas de vidas. San José, Costa Rica. 206 p.
- HOLFORD, I. 1997. Soil Phosphorus: Its Measurement, and its Uptake by Plant. Aust. J. Soil Res., 35: 227-39.pp
- INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI, 2000. Métodos analíticos del laboratorio de suelos. Cuarta edición. Bogotá. Colombia. 663p.
- LIN C; MOTTO H.L; DOUGLAS L.A; BUSSCHER W.J. 1983. Multifactor kinetics of phosphate reactions with minerals in acid soils: II. Experimental curve fitting. Soil Science America Journal 47:1103-1109pp.
- MCGECHAN, MB; LEWIS DR. 2002. principles, Equations and Models. Biosystems Engineering, by Soil, Part 1: 82 819, 1-24.
- NAME, B; CORDERO, A. 1987. Recomendaciones para la fertilización de suelos: Hojas guías por cultivo. En: S. Jaramillo editor, Compendio de los resultados de Investigación presentados en la Jornada Científica. IDIAP. Santiago, PAN. p. 22
- OLSEN, R.S; WATANABE, F.S. 1957. A Method to Determine a Phosphorous Adsorption Maximum of Soils as Measured by Langmuir Isotherms. Soil Science Society of America Journal, 21, 144-149.
- PRABHAKARAN, N. 1996. The buffering power of plant nutrients and effects on availability. Advances in Agronomy 57 :237-286.pp
- QUINTERO, C. E. 2002. Dosificación del P según tipos de suelos. Facultad de Ciencias Agropecuarias-UNER. Informaciones Agronómicas del cono sur N°.16. 8-9pp
- QUINTERO, C.E; BOSCHETTI, N.G; BENAVIDEZ, R.A. 1999. Phosphorus Retention in Some Soils of the Argentinian Mesopotamia. Comm. Soil Sci. Plant Ana. 30(9 y 10):1449-1461.pp

- ROJAS, C. 2015. Interpretación de la disponibilidad de P en los suelos de Chile. Consultado en línea el 13 de diciembre de 2017. Disponible en: <http://www2.inia.cl/medios/biblioteca/serieactas/NR33852.pdf>
- RUBIO, G. 2015. ¿Cuánto fósforo hay que aplicar para alcanzar el umbral crítico de fósforo disponible en el suelo? II. Cálculos para las zonas sur y norte de la región Pampeana, Argentina. *Informaciones Agronómicas* #35. 9p
- RUBIO, G. 2002. Conectando el P del suelo con la planta. Simposio: “Enfoque sistémico de la Fertilización Fosfórica”. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*. 19p
- SILVA, M. 2011. Adsorción y desorción de P en suelos del área central de la región Pampeana. Tesis Para optar al Grado Académico de Doctor en Ciencias Universidad Nacional de Córdoba. Argentina. 179p
- SIMONS, M. 2005. La disponibilidad de P evaluada por el método de Olsen en suelos ácidos de Portugal: significado agronómico y ambiental. Universidad de Córdoba. España. 6 p.
- SPOSITO, G. 1982. On the use of the Langmuir equation in the interpretation of “adsorption” phenomena. II. The “two surface” Langmuir equation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46:1147-1152.
- TORRENT, J; SCHWERTMANN, U; BARRÓN, V. 1992. Fast and slow phosphate sorption by goethite-rich natural materials. *Clays and Clay Minerals* España 40(1):14-21pp
- VARGAS, W. 2012. Planificación y control de la contaminación ambiental. Ciclo del fósforo. Universidad mayor de San Andrés. Bolivia. 12 p.
- VILLAREAL, J; RAMOS, I; VILLALAZ, J; SANTOS, A. 2017. Clasificación taxonómica y caracterización físico-química de suelos de la región de Azuero-Panamá. XI Congreso de suelos de Costa Rica. 25 al 27 de octubre de 2017. San José, Costa Rica. www.sueloscr.com/congreso.
- VILLARREAL, J. 2012. Determinación De La Adsorción Máxima De P En Suelos De Panamá Mediante Isotermas De Langmuir. Resúmenes, PCCMCA, 2012. Ciudad de Panamá. Instituto de Investigación Agropecuaria de Panamá.
- VILLARREAL, J; BARAHONA, L; CASTILLO, O. 2015. Determinación de las principales formas de P en suelos de Panamá. En: Actas LX Reunión Anual del Programa Cooperativo Centroamericano para el Mejoramiento de Cultivos y Animales (PCCMCA), 4 al 7 de mayo de 2015. Ciudad de Guatemala.
- VILLARREAL, J; NAME, B. 1996. Técnicas analíticas del Laboratorio de suelos. Instituto de Investigación Agropecuaria de Panamá. IDIAP-Divisa. 120 p.

- VILLARREAL, J; NAME, B; GARCÍA, R. 2013. Zonificación de suelos de Panamá en base a niveles de nutrientes. Rev. Ciencia. Agropecuaria. Panamá 21:71-89pp
- VIOLANTE, A; PIGNA, M; RICCIARDELLA, M; GIANFREDA L. 2002. Adsorption of phosphate on variable charge minerals and soils as affected by organic and inorganic ligands. Developments in Soil Science, Volume 28A Elsevier Science B.V. 279-295pp

CAPÍTULO 2: EFECTO DE LA RETENCIÓN DE FÓSFORO EN EL SUELO SOBRE LA FERTILIZACIÓN FOSFATADA DEL CULTIVO DE MAÍZ.

EFFECTO DE LA RETENCIÓN DE FÓSFORO EN EL SUELO SOBRE LA FERTILIZACIÓN FOSFATADA DEL CULTIVO DE MAÍZ

RESUMEN

Con el objetivo de validar las dosis de P, para el cultivo de maíz basadas en el índice de retención de P en suelos alfisoles e inceptisoles de la región de Azuero se establecieron ensayos en cinco de las localidades en donde se realizaron las Isotermas de Langmuir. De los suelos alfisoles se seleccionaron las localidades Los Destiladeros, Nuevo Ocu y El Ejido, y de los suelos inceptisoles San José y La Colorada. Cada ensayo tuvo un área total de 315 m² y cada unidad experimental fue de 15 m². Se utilizó un diseño experimental de bloques completamente al azar con 3 repeticiones. Como material genético para este ensayo se utilizó el híbrido comercial de maíz P-4226. Las variables de estudio fueron: altura de planta y mazorca, acame, materia seca, número de planta y mazorcas, rendimiento, contenido de P en el follaje. El modelo de regresión cuadrática utilizado solo explicó la variación que existe en el contenido de P en el follaje en función de la dosis de P en la localidad de Los Destiladeros. En esta localidad el 36 % de la variación del contenido de P en el follaje fue explicada por la dosis de P. El análisis de varianza combinado para las 5 localidades indicó diferencias significativas por tratamiento para algunas variables. Peso por mazorca y rendimiento de grano presentaron diferencias significativas. La variable contenido de P en el follaje fue la única que presentó diferencia altamente significativa. El resto de las variables no presentaron diferencias significativas.

PALABRAS CLAVES: dosis, localidad, Isotermas de Langmuir.

EFFECT OF SOIL PHOSPHORUS RETENTION ON PHOSPHATE FERTILIZATION IN CORN CULTIVATION

ABSTRACT

The objective of this study was to validate the doses of phosphorus (P) for corn cultivation based on the P retention index in alfisols and inceptisols soils of the Azuero region, trials were established in five localities where the Langmuir Isotherms was made (Los Destiladeros, Nuevo Ocu and El Ejido localities as alfisols soils samples and San José and La Colorada as inceptisols soils samples). Each trial had a total area of 315 m² and each experimental unit was 15 m². A completely randomized block experimental design with 3 replications was used. The commercial corn hybrid P-4226 was used as the genetic material for this assay. The study variables were: height of plant and ear, lodging, dry matter, number of plants and ears, yield, content of P in foliage. Quadratic regression model used explained the variation that exists in the content of P in foliage as a function of the dose of phosphorus only in Los Destiladeros locality. In this locality, 36% of the variation of P content in foliage was explained by the dose of P. The combined analysis of variance for the five localities indicated significant differences by treatment for some variables. Weight per ear and grain yield showed significant differences. Content of P in foliage was the only variable with highly significant difference. The rest of the variables did not present significant differences.

KEYWORDS: dose, locality, Langmuir isotherms.

INTRODUCCIÓN

Para la zafra 2016-2017, se sembraron, en Panamá más de 58 mil hectáreas de maíz, con rendimientos superiores 115 mil toneladas. La provincia de Los Santos, lideró la siembra con más de 19,000 hectáreas, seguido de Chiriquí con 11,800 hectáreas y el resto en las demás provincias (Instituto Nacional de Estadística y Censo 2018). Se puede observar que los rendimientos son bajos lo cual es característicos de todos los sistemas de producción de grano. Entre las causas, se debe a diversos factores bióticos y abióticos, además de técnicas de manejo inadecuadas en lo que respecta a densidad, control de malezas, plagas y fertilización.

Dentro de la fertilización, el P es después del nitrógeno, el segundo elemento más importante para el crecimiento de las plantas, la producción de los cultivos y su calidad. Además, es uno de los nutrientes que más limita la producción agrícola en los trópicos. La respuesta de los cultivos a la fertilización fosfatada depende del nivel de P disponible en el suelo, pero también es afectada por factores del suelo, del cultivo y de manejo del fertilizante (García 2001).

El P, constituye un componente primario de los sistemas responsables de la captación, almacenamiento y transferencia de energía, y es componente básico en las estructuras de

macromoléculas de interés crucial, tales como ácidos nucleicos y fosfolípidos, por lo que se puede decir, que su papel está generalizado en todos los procesos fisiológicos. Se caracteriza por su baja movilidad en el suelo y reducida eficiencia de absorción por los vegetales. Como contrapartida posee una elevada residualidad hacia los cultivos subsiguientes. Esta característica hace que su manejo pueda realizarse con dos enfoques: el criterio de suficiencia y el criterio de reconstrucción y mantenimiento. El criterio de suficiencia se basa en satisfacer las necesidades del cultivo aplicando la dosis óptima económica. El criterio de reconstrucción y mantenimiento, que considera mantener o reconstruir los niveles del nutriente en el suelo, y propone dosis que por lo común permiten obtener el rendimiento máximo. El primero de estos criterios sugiere dosis menores y un mayor retorno a la inversión en fertilizante, y por lo tanto es el más comúnmente utilizado. (Ferraris 2008). En Panamá la mayoría de los suelos tienen niveles bajos de P disponible y se espera que den una respuesta positiva a la aplicación de este elemento (Name y Cordero 1987).

OBJETIVO E HIPÓTESIS

Objetivo

- Validar las dosis de P para el cultivo de maíz, basadas en el índice de retención de P en suelos alfisoles e inceptisoles de la región de Azuero.

Hipótesis

- Ho: La dosis de P para el cultivo de maíz, basada en el índice de retención de este nutrimento en suelos alfisoles e inceptisoles de la región de Azuero no afecta el desarrollo de este cultivo.
- Ha: La dosis de P para el cultivo de maíz, basada en el índice de retención de este nutrimento en suelos alfisoles e inceptisoles de la región de Azuero afecta el desarrollo de este cultivo.

I. REVISIÓN DE LITERATURA

1. FÓSFORO EN LOS SUELOS DEL TRÓPICO.

La deficiencia de P en los suelos del trópico y subtrópico es un problema de reconocida importancia, cuya magnitud constituye una de las limitantes de mayor trascendencia en la producción de los cultivos. La baja disponibilidad del P está asociada a bajos contenidos de P total, alta estabilidad de los compuestos fosfatados del suelo (que implica baja solubilidad del mismo y por tanto, una lenta liberación de formas disponibles para la planta) y a una baja intensidad de la mineralización de los compuestos orgánicos fosfatados (Fassbender y Bornemisza 1987).

Los suelos tropicales, dominados por minerales arcillosos de carga variable (caolinita, óxidos de Fe y Al, alófana, imogolita, etc.) son estables hasta pHs bajos y solamente cuando el pH del suelo llega a valores menores que 5,5 el Fe y el Al se liberan a la solución del suelo y pueden reaccionar con el fosfato. En este caso la inmovilización del P está relacionada con la alta reactividad o afinidad por P de las superficies de las arcillas

presentes en el suelo. Este proceso retiene apreciables cantidades de P en un rango amplio de pH (Fixen 2014).

2. IMPORTANCIA DEL FÓSFORO EN EL DESARROLLO DEL CULTIVO DEL MAÍZ.

El P es un componente de ciertas enzimas y proteínas, trifosfato de adenosina (ATP), ácidos ribonucleicos (RNA), ácidos desoxirribonucleicos (DNA), y fitina. El ATP está involucrado en varias reacciones de transferencia de energía, y el RNA y DNA son componentes de la información genética (Jones 1998).

Desempeña un papel importante en la fotosíntesis, la respiración, el almacenamiento y transferencia de energía, la división y crecimiento celular y otros procesos que se llevan a cabo en la planta. Además, promueve la rápida formación y crecimiento de las raíces, mejora la calidad de la fruta, hortalizas y granos además de estar involucrado en la transferencia de características hereditarias de una generación a la siguiente (Potash and Phosphate Institute 1997).

La planta absorbe la mayor cantidad de P como ión ortofosfato primario (H_2PO_4), seguido del ión ortofosfato secundario (HPO_4) y otras formas que son absorbidas en menores cantidades. Una vez que el P es absorbido, éste es distribuido a cada una de las células, concentrándose más en las partes reproductivas (Balta *et al.* 2015).

3. FERTILIZACIÓN FOSFATADA

Al abordar la fertilización fosfatada en maíz hay que considerar el funcionamiento del P en el sistema suelo-planta. Desde el punto de vista del manejo nutricional, el principal aspecto a considerar es su baja movilidad en el suelo. Lo hace principalmente por difusión además, de la presencia de retención específica de los fosfatos en las arcillas, cuya magnitud depende de la cantidad y mineralogía de esta fracción. Por otro lado, el pH es un factor que impacta considerablemente sobre la disponibilidad de P. La determinación de la dosis de P aplicada dependerá principalmente del nivel de disponibilidad (INTA 2018).

La disponibilidad de P en suelo para las plantas se determina mediante la utilización de soluciones extractoras, las cuales deben extraer los nutrientes de las fracciones disponibles, tal como lo hacen las plantas. Aunque no es necesario que el método de análisis extraiga exactamente la misma cantidad del nutrimento que la planta, el valor extraído debe correlacionar bien con la cantidad absorbida por las plantas (Lindsay y Cox 1985).

4. NIVEL CRÍTICO DE FÓSFORO PARA EL CULTIVO DE MAÍZ

La determinación del nivel crítico de un elemento es muy importante para valorar el grado de disponibilidad del mismo para las plantas, y se realiza por medio de estudios de correlación entre los rendimientos relativos del cultivo (porcentaje de respuesta de un tratamiento con respecto a un testigo, al cual se le adiciona los tratamientos óptimos para que produzca al máximo) y la concentración del elemento en el suelo (Cabalceta 1993). Por nivel crítico se entiende aquella concentración de un elemento, por encima de la cual,

la probabilidad de incrementos sensibles en la producción, debido a la aplicación del elemento es baja; mientras que, valores inferiores probablemente corresponderán a producciones pobres y la probabilidad de incrementos debido a la aplicación del elemento es alta, esto en relación con el método analítico utilizado y a la respuesta del cultivo cuando se aplica un determinado nutriente (Cabalceta y Cordero 1994).

Estudios realizados en la estación experimental agropecuaria Rafaela en la región de Santa Fe, Argentina (Fontanetto *et al.* 2010), determinaron que el nivel crítico de P Bray era de 18 mgkg^{-1} según la metodología de Cate y Nelson (1965). En el área de Balcarce, Argentina, los suelos con niveles de P Bray menores a 15 mg/l muestran respuestas medias en secano de 800 kgha^{-1} , con aplicaciones de 46 a 55 kgha^{-1} de P_2O_5 en cultivos bajo riego, se observaron respuestas significativas al agregar P aún con niveles de P en el suelo entre 18 y 20 mg/l^{-1} (García *et al.* 1997). En Panamá la dosis que se está recomendando para las siembras de este cultivo es de $68 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ aplicados en banda al momento de la siembra, junto a los otros nutrientes. Estudios recientes indican que el aumento de la densidad de plantas a $6,25 \text{ plantas m}^{-2}$ incrementó los rendimientos de grano en más de una tonelada por hectárea (Gordon *et al.* 2000). El nivel crítico determinado por Gordon (2014) para el P es de 13.3 mgkg^{-1} para el cultivo del maíz.

En experimentos realizados en la región de sabanas ácidas de Colombia, se encontraron respuestas lineales con la aplicación de hasta 90 kgha^{-1} de P_2O_5 en suelos con contenido de P de 2 mgkg^{-1} y de aplicaciones de 60 kgha^{-1} de P_2O_5 en suelos con bajo contenido de P de 14 mgkg^{-1} (Bernal *et al.* 2014).

Como se puede observar la mayoría de las recomendaciones para la fertilización fosfatada se basa en el nivel crítico del elemento. Sin embargo, las recomendaciones de

fertilización requieren de alguna determinación o índice, que evalúe el poder de retención de P del suelo. Con la utilización de la capacidad de retención de P que es una propiedad de cada suelo, relacionada con el porcentaje de arcilla y óxidos libres (Boschetti *et al.* 1998; Quintero *et al.* 1999), se podrían estimar dosis a aplicar teniendo en cuenta la disponibilidad del nutriente en el suelo junto con la naturaleza de los sedimentos que lo constituyen.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

1. LOCALIZACIÓN

Para la verificación del efecto de la retención de P en el suelo sobre la fertilización fosfatada del cultivo de maíz, se establecieron ensayos en cinco de las localidades en donde previamente se realizaron las Isotermas de Langmuir. Las localidades seleccionadas fueron: Los Destiladeros (Loc.1), Nuevo Ocuí(Loc.2), San José(Loc.3), La Colorada(Loc.4) y El Ejido(Loc.5) (Figura 8). Cada ensayo tenía un área total de 3 m² y cada unidad experimental era de 15.6 m². Comprendida de cuatro surcos de 5.2 metros de largo separados a 0.75 metros. Las unidades de muestreo fueron los dos surcos centrales de cada tratamiento (Figura 9).

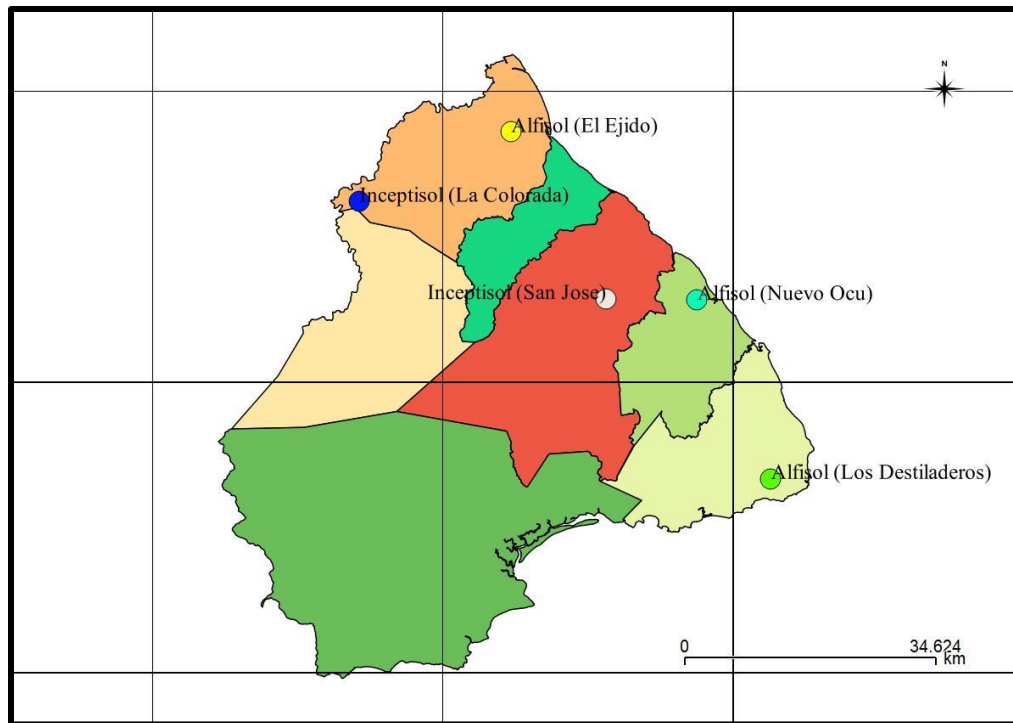


Figura 8. Localidades seleccionadas en la provincia de Los Santos.

2. DISEÑO EXPERIMENTAL

Se utilizó un diseño experimental de bloques completamente al azar con tres repeticiones y siete tratamientos de acuerdo con siguiente modelo matemático:

$Y_{ij} = \mu + \beta_i + c_j + \varepsilon_{ij}$; en donde:

Y_{ij} = valor del carácter estudiado

μ = media general

β_i = efecto del bloque ($i=3$)

c_j = efecto del tratamiento ($j=7$)

ε_{ij} = error experimental

Los tratamientos evaluados oscilaron entre 0 a 240 kg P₂O₅·ha⁻¹ (Cuadro VII). Estas dosis fueron aplicadas al momento de la siembra.

Cuadro VII. Tratamientos evaluados en el experimento. Los Santos, 2016

Tratamiento	Dosis kg P·ha ⁻¹	kg P ₂ O ₅ ·ha ⁻¹
1	0	0
2	40	92
3	80	183
4	120	275
5	160	366
6	200	458
7	240	550

3. MANEJO AGRONÓMICO

Como material genético para este ensayo se utilizó el híbrido comercial de maíz P-4226. La siembra se realizó en la fecha óptima, colocando dos semillas en un golpe y en el siguiente solo una (2:1:2). A los 15 días después de la siembra se realizó un raleo dejando una planta por golpe para una densidad final de 6.6 plantas por m². Todos los tratamientos fueron complementados con una fertilización base de 200 kg de nitrógeno(N)ha⁻¹, se utilizó como fuente la urea (46% N) con el siguiente fraccionamiento: 10% a la siembra, 40% a los veinte días después de la siembra (dds) y 50% a los 37 dds. También se le aplicó 20 kgK₂Oha⁻¹ al momento de la siembra. El control de malezas se realizó con aplicaciones pre-emergente de herbicidas complementado con controles posteriores de tipo manual (Gordón 2007).



Figura 9. Establecimiento de ensayos de evaluación del índice de retención de P

4. VARIABLES EVALUADAS

- a. **Altura de planta:** se determinó a los 70 días después de la siembra.
- b. **Acame:** se contaron a la cosecha las plantas con acame.

c. **Materia seca o peso de rastrojo:** a la cosecha se cortaron las plantas de un surco, se pesaron. Se tomó una muestra para determinar el contenido de humedad. Esta muestra se pesó antes y después de colocarse en el horno. El porcentaje de humedad obtenido se le restó al peso obtenido en el campo.

d. **Número de plantas y mazorcas por metro cuadrado:** se contaron tanto las plantas como las mazorcas para poder calcular el rendimiento.

e. **Rendimiento de grano:** Se cosecharon los dos surcos centrales de cada tratamiento, se pesaron las mazorcas y se le determinó el contenido de humedad (Figura 10).

f. **Determinación de la materia seca:** antes de la floración se tomó una muestra de cada tratamiento, fue pesada y llevada al horno. Una vez seca se sacó del horno y fue pesada nuevamente. Las muestras secas fueron molidas y pasadas por un tamiz N° 20 (2 mm de abertura en la malla), luego fueron guardadas en sobres de papel manila a temperatura ambiente.



Figura 10. Cosecha de ensayos por localidad. Los Santos 2017.

5. ANÁLISIS DE LABORATORIO

a. **Mineralización vía húmeda:** se tomó 0.5 g de la muestra molida y se colocó en un matraz Erlenmeyer de 50 ml, luego se le colocaron de 10 a 15 perlas de ebullición y se añadieron 15 ml de la solución A (metanol, ácido sulfúrico concentrado y peróxido de hidrógeno al 30%), luego se pusieron a digerir a 250°C en una cámara de extracción de gases hasta que la muestra se tornó oscura, luego se agregaron 5 ml de la solución B (Metanol y peróxido de hidrógeno al 30%) hasta que la muestra se tornó oscura

nuevamente, luego se aforó a 50 ml con agua destilada, se le aplicó carbón activado para aclarar la muestra, se agitó y filtró, finalmente se guardó el extracto bajo refrigeración (Figura 11).



Figura 11. Mineralización de las muestras vía húmeda y determinación de P.

b. Determinación de P: del extracto digerido por la mineralización vía húmeda, se tomaron 5 ml y se agregaron 25 ml de agua destilada, luego de esa dilución se tomó una alícuota de 2.5 ml y se le agregó 14.5 ml de la solución de color con molibdato de amonio, se esperaron 30 minutos y se leyó en el espectrofotómetro de luz UV a 680 nm (Villarreal y Name 1996).

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El modelo de regresión cuadrática utilizado no explicó las variaciones en el rendimiento, materia seca, altura de planta y mazorca, acame y número de plantas y mazorcas en función de las dosis de P aplicadas (Anexo). Solo la variación en el contenido P en el follaje fue explicado en el suelo alfisol de la localidad de Los Destiladeros (Cuadro VIII). A la vista del resultado analítico se puede afirmar que el ajuste del modelo es bajo con un valor de $R^2 = 0.36$. Solo el 36 % de la variabilidad de la variable dependiente es explicado por el modelo de regresión.

Cuadro VIII. Cuadrados medios del análisis de regresión cuadrática para la variable P en el follaje.

Fuente de variación	gl	Los Destiladeros	Nuevo Océ	San José	La Colorada	El Ejido
Regresión	1	541.78**	3.11	38.25	0.37	0.47
Error	19	51.53	26.41	20.13	13.95	22.75
R^2		0.36	0.01	0.09	0.00	0.00

** diferencia altamente significativa.

El análisis de varianza combinado para las 5 localidades indicó diferencias significativas por tratamiento para algunas variables. Peso por mazorca y rendimiento de grano, presentaron diferencias significativas. La variable contenido de P en el follaje, fue la única que presentó diferencia altamente significativa. El resto de las variables no presentaron diferencias significativas (cuadro IX).

Cuadro IX. Cuadrados medios del análisis de varianza para las variables de rendimiento de grano y otras características agronómicas para determinar el efecto de la fertilización fosfatada en el maíz.

F de V	gl	ALPT	PTM ²	MZM ²	MXP	PMZ	RENDG	ACA	RAST	BIOM	IND	FOS
LOC	4	5893.7	0.14	0.22	0.004	7850.4	27.10	425.1	333.10	483.1	0.06	254.6
REP(LOC)	10	1202.9	0.08	0.21	0.003	466.1	2.61	62.7	18.04	29.4	0.00	8.2
TRAT	6	116.1	0.05	0.12	0.001	197.9*	1.25*	38.8	2.14	5.5	0.00	91.3**
LOC*TRAT	24	130.5	0.09	0.12	0.001	130.9	0.68	38.5	1.92	3.3	0.00	85.5
Error	60	127.0	0.07	0.10	0.003	83.6	0.53	34.4	3.54	5.0	0.00	7.7
H		0.77	0.69	0.80	0.72	0.86	0.88	0.80	0.78	0.85	0.49	0.84
CV		4.7	3.9	5.0	5.2	7.6	9.3	80.4	17.4	12.7	10.8	11.8
DMS/Rango		1.03	1.05	0.87	1.75	0.57	0.63	0.89	1.48	1.01	2.14	0.28

LOC= localidad, TRAT= tratamiento, ALPT=altura de planta(cm), PTM²=plantas por m², MZM²=mazorcas por m², MXP=mazorcas por plata, PMZ=peso por mazorca(gr), RENDG= rendimiento de grano(Mgha⁻¹), ACA= acame, RAST=peso de rastrojo(Mgha⁻¹), BIOM= % de biomasa, IND= índice de cosecha, FOS= Contenido de P en el follaje (%). **, * Diferencias estadísticas al 1 y 5%, respectivamente.

Los rendimientos promedios por localidad, estuvieron entre 9.83 y 5.71 Mgha⁻¹. Siendo el suelo alfisol de localidad 2 con una dosis de 240 kgPha⁻¹el que presentó los rendimientos más altos. Los rendimientos más bajos se obtuvieron el suelo inceptisol de la localidad 3 al cual no se aplicó P. Para la variable porcentaje de biomasa los valores máximos se presentaron en el suelo alfisol localidad 2 con aplicaciones de 240 kgPha⁻¹ con un porcentaje de 27.22. El contenido máximo de P en el follaje se encontró en el suelo alfisol con aplicaciones de 0kgPha⁻¹ P en la localidad 1 con 21.12%. El porcentaje más bajo fue de 4.58%. y se obtuvo el suelo inceptisol de la localidad 4 con aplicaciones de 80 kgPha⁻¹ (cuadro X).

Cuadro X. Promedios de las diferentes variables por localidad y tratamiento.

LOC	TRAT	N	ALPT	PTM2	MZM2	MXP	PMZ	RENDG	ACA	RAST	BIOM	IND	FOS	
1	1	3	225	6.83	6.75	0.99	96	6.48	8.2	7.63	13.20	0.43	29.93	
1	2	3	242	6.67	6.54	0.98	111	7.23	5.1	9.62	15.83	0.39	5.47	
1	3	3	243	6.63	6.66	1.01	118	7.83	8.4	8.46	15.19	0.44	6.20	
1	4	3	223	6.37	6.45	1.02	107	6.91	6.8	7.76	13.70	0.44	7.01	
1	5	3	245	6.58	6.45	0.98	112	7.24	10.5	8.72	14.94	0.42	7.95	
1	6	3	238	6.75	6.71	0.99	107	7.12	13.9	8.33	14.46	0.42	5.92	
1	7	3	240	6.97	6.71	0.96	111	7.43	8.1	8.85	15.24	0.42	5.35	
2	1	3	242	6.79	6.50	0.96	142	9.20	0.6	18.26	26.17	0.30	12.14	
2	2	3	245	6.50	6.28	0.97	132	8.30	3.9	16.97	24.11	0.30	16.87	
2	3	3	248	6.45	6.24	0.97	146	9.14	2.6	17.43	25.30	0.32	9.49	
2	4	3	245	6.54	6.50	0.99	135	8.79	2.6	17.28	24.84	0.31	8.33	
2	5	3	250	6.58	6.54	0.99	144	9.40	1.3	17.28	25.36	0.32	13.76	
2	6	3	247	6.28	6.24	0.99	155	9.69	4.7	18.00	26.33	0.32	20.20	
2	7	3	252	6.75	6.71	0.99	146	9.83	2.5	18.77	27.22	0.31	18.60	
3	1	3	222	6.37	5.86	0.91	95	5.71	4.0	8.46	13.38	0.39	11.53	
3	2	3	237	6.96	6.71	0.96	113	7.59	1.3	9.74	16.27	0.40	18.49	
3	3	3	217	6.67	6.67	1.00	97	6.53	8.9	8.16	13.77	0.41	9.70	
3	4	3	237	6.88	6.67	0.97	117	7.80	1.2	11.23	17.94	0.37	10.57	
3	5	3	227	6.75	6.20	0.92	106	6.71	4.5	10.46	16.23	0.35	11.60	
3	6	3	245	6.96	6.67	0.96	119	7.93	0.6	10.56	17.39	0.40	14.37	
3	7	3	237	6.67	6.63	0.99	117	7.71	5.2	10.67	17.30	0.39	19.75	
4	1	3	217	6.63	6.58	0.99	100	6.56	12.9	7.69	13.33	0.44	11.83	
4	2	3	207	6.62	6.63	1.00	105	6.95	14.8	6.41	12.38	0.49	6.80	
4	3	3	215	6.58	6.24	0.95	100	6.24	14.4	7.02	12.40	0.43	4.58	
4	4	3	217	6.84	6.71	0.98	105	7.02	13.9	8.72	14.76	0.41	13.05	
4	5	3	217	6.75	6.62	0.98	95	6.30	9.5	8.67	14.08	0.39	5.40	
4	6	3	210	6.45	6.45	1.00	108	6.94	25.5	8.15	14.12	0.42	5.05	
4	7	3	213	6.71	6.75	1.01	101	6.82	6.3	7.80	13.66	0.43	9.76	
5	1	3	258	6.41	6.24	0.97	138	8.60	8.8	10.05	17.45	0.42	21.12	
5	2	3	255	6.58	6.45	0.98	135	8.67	12.3	9.90	17.35	0.44	10.22	
5	3	3	257	6.54	6.33	0.97	137	8.67	6.6	10.82	18.28	0.41	20.84	
5	4	3	258	6.50	6.24	0.96	142	8.88	6.7	10.72	18.36	0.42	18.37	
5	5	3	262	6.62	6.32	0.95	148	9.36	1.9	9.18	17.23	0.48	13.48	
5	6	3	255	6.62	6.41	0.97	141	9.00	7.1	10.41	18.15	0.43	16.35	
5	7	3	262	6.67	6.50	0.97	139	8.99	9.6	10.46	18.19	0.43	15.60	
LOC x TRAT			DMS	18.41	0.42	0.53	0.08	14.93	1.19	9.6	3.07	3.64	0.07	4.54

LOC= localidad (1=Los Destiladeros, 2=Nuevo Ocu, 3=San José, 4=La Colorada, 5= El Ejido). TRAT= tratamiento, ALPT=altura de planta(cm), PTM²=plantas por m², MZM²=mazorcas por m², MXP=mazorcas por plata, PMZ=peso por mazorca(gr), RENDG= rendimiento de grano(Mgha⁻¹), ACA= acame, RAST=peso de rastrojo(Mgha⁻¹), BIOM= % de biomasa, IND= índice de cosecha, FOS= Contenido de P en el follaje (%).

Debido a los altos niveles de adsorción P por los suelos alfisoles e inceptisoles de las localidades en estudio, las dosis de P para cubrir las necesidades del cultivo son relativamente altas en comparación con las dosis recomendadas por el laboratorio de suelos del IDIAP. Esta situación generó ciertas complicaciones al existir en el mercado nacional pocas fórmulas fosfatadas que no alteraran el balance nutricional del cultivo. Fosfomax, polvo mojable resultado de roca fosfórica finamente molida, cuya composición química es de 30% de P (P_2O_5), 40% de Calcio (CaO) y 10% de Silicio (SiO_2) fue la fórmula utilizada ya que cumplía con los requerimientos estipulados.

La falta de respuesta a esta fuente de P, puede ser explicada en primer lugar por la formación de fosfato de calcio que es un compuesto insoluble. Molina (2014), indica que en siembras nuevas, la cal debe ser incorporada antes de sembrar. Una vez aplicada se debe esperar un tiempo prudencial (un mes) para que reaccione antes de añadir el fertilizante fosfatado y así evitar pérdidas del mismo por precipitación.

Estudios realizados por Quintero *et al.* (1996), en suelos de los órdenes alfisoles e inceptisoles de Argentina, indican que los valores de K para estos suelos fueron de 1.47 y 1.27 respectivamente. Si comparamos estos resultados con los obtenidos en el Capítulo 1 de esta investigación (Cuadro IV y V), se observa que, de las cinco localidades, solo el suelo de la localidad de San José presentó un valor superior de 1.75. El resto de los suelos presentaron valores inferiores a 0.60. Bajos valores del factor K indica que el P no está adsorbido con mucha energía, por lo cual puede pasar fácilmente a ser disponible para las plantas.

Por otra parte, estudios realizados por Gordon *et al.* (2016), durante diez años en suelos alfisoles de El Ejido, provincia de Los santos, república de Panamá, sugieren que aplicaciones de 30 kgP ha^{-1} , proveen las necesidades de fósforo requeridas por el cultivo. Obteniendo a través de los años rendimientos relativos por encima del 95%. El índice de retención de P, determinado por medio de las Isotermas de Langmuir en el mismo suelo, sugiere dosis que superan en más del 79 por ciento a 30 kg ha^{-1} (cuadro VI). Estos resultados indican una posible subestimación del factor intensidad y una sobre estimación del factor cantidad. Esto puede explicar la falta de respuesta a las aplicaciones de P de acuerdo a las dosis determinadas por este método.

IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. CONCLUSIONES

- La falta de respuesta a las aplicaciones de P basadas en el índice de retención de este nutrimento en el suelo pudo ser debido a la baja energía de retención presente en los diferentes suelos alfisoles e inceptisoles.
- Las dosis de P determinadas de acuerdo al índice de retención de P en suelos alfisoles e inceptisoles pueden estar sobreestimadas como resultados de la subestimación del P en solución y la sobrestimación de la capacidad de retención P por el suelo.

2. RECOMENDACIONES

- Repetir este experimento utilizando una fuente de P que no altere las concentraciones del mismo en la solución del suelo.
- Realizar el mismo experimento, pero utilizando otro método para la determinación del P en solución y el P retenido.

V. BIBLIOGRAFIA

- BALTA, R; RODRÍGUEZ, A; GUERRERO, R; CACHIQUE, D; ALVA, E; ARÉVALO, L; LOLI, O. 2015. Absorción y concentración de nitrógeno, P y potasio en sachá inchi (*Plukenetia volubilis* L.) En suelos ácidos, San Martín, PERÚ. Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana (IIAP). Programa de Investigación en Biodiversidad Amazónica (PIBA) / La Molina (UNALM). Facultad de Agronomía, Departamento Académico de Suelos. La Molina, Lima, Perú. VOL. 24 (2): 123-130pp
- BERNIER, R; ALFARO, M. 2006. Acidez de los suelos y efecto del encalado. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, INIA. Osorno, Chile. Boletín INIA N°51. 46p
- BOSCHETTI, N.G; QUINTERO, C.E; BENAVIDEZ, R.A. 1998 Caracterización del factor capacidad-tapa de fosfatos en suelos de Entre Ríos, Argentina. Revista Brasileira de la Ciencia do Solo. 22:95-99. Pp
- CABALCETA, G. 1993. Niveles críticos de P, azufre y correlación de soluciones extractoras en Ultisoles, Inceptisoles, Vertisoles y Andisoles de Costa Rica. Tesis de maestría, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. 167 p.
- CABALCETA, G; CORDERO, A. 1994. Niveles críticos de P en Ultisoles, Inceptisoles, Vertisoles y Andisoles de Costa Rica. Agronomía Costarricense 18(2):147-161.pp
- CATE, R.B.JR; NELSON, L. 1965. A rapid method for correlation of soil test analyses with plant response data. North Carolina Agric. Exp. Station, International Soil Testing Series, Technical Bulletin No. 1. Raleigh. USA. 103p
- CHAVES, M. 1984. La acidez y el encalado de los suelos. Dirección de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA). Revista Ciencia y Técnica en la Agricultura Cañera (La Habana, Cuba) N° 2: 107-116. pp.
- FASSBENDER, H.; BORNEMISZA, E. 1987. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. 2.ed. Costa Rica: IICA. 420p.

- FERRARIS, G. 2008. Fertilización fosforada en cultivos extensivos. Criterios de diagnóstico y herramientas tecnológicas para su manejo en el norte – Centro-oeste de Buenos Aires y sur de Santa Fe. En: AIANBA, editores. IV Jornada de Maíz INTA EEA Pergamino. AIANBA 23 de julio de 2008, Pergamino, ARG. 9 p.
- FIXEN, P. 2014. Dinámica del P en el suelo y en el cultivo en relación al manejo de los fertilizantes fosfatados. International Plant Nutrition Institute. USA. 4 p
- FONTANETTO, H; KELLER, O; GAMBAUDO, S; ALBRECHT, J; GIANINETTO, G; WEDER, E; Zen, O; DAVEREDE, I.; y GARCÍA, F. 2010. Respuesta del maíz a la fertilización fosforada en la región centro de santa fe. Información técnica cultivos de verano. Publicación Miscelánea N° 118 98 EEA INTA Rafaela, Rafaela, Santa Fe, Argentina. C. C. 22. 2300-Rafaela. 103p
- GARCÍA, F. 2001. Fertilización del maíz en la región pampeana. En: AIANBA, editores, Actas VII Congreso Nacional de Maíz. AIANBA 7 al 9 noviembre de 2001. Pergamino, Buenos Aires, ARG. 6 p.
- GARCÍA, F.O; FABRIZZI, K.P; RUFFO, M; SCARABICCHI, P. 1997. Fertilización nitrogenada y fosfatada de maíz en el sudeste de Buenos Aires. En: Actas VI Congreso Nacional de Maíz, Tomo II. Pergamino, Buenos Aires, noviembre de 1997. AIANBA, Pergamino, Argentina.137-143pp
- GÓMEZ, A. 1989. Efecto de dos sales fertilizantes sobre la disponibilidad y absorción de P por el frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). Tesis de Licenciatura. ITA No. 20 Aguascalientes, México. 122 p.
- GORDON, R. 2007. Guía técnica: Manejo integrado del cultivo de maíz 2.ed. Instituto de Investigación Agropecuaria de Panamá. 47p
- GORDON, R. 2014. Los granos básicos y la variabilidad climática en Azuero: Caso maíz. Conferencia. Primer congreso científico CRULS Universidad de Panamá. Las Tablas Panamá.
- GORDON, R; FRANCO, J; VILLARREAL, J; SMITH, J. 2016. Manejo de la fertilización fosforada en el cultivo de Maíz, El Ejido, Panamá 2004-2013. Agron. Mesoam. 95-108.pp
- GORDON, R; GONZÁLEZ, A; FRANCO, J. 2000. Manejo de la fertilización nitrogenada en el cultivo de maíz. Azuero, Panamá, 1996–1998. Rev. Cienc. Agropecu.10:123-134.
- INTITUTO NACIONAL DE ESTADISTICA Y CENSO. 2018. Consultado la línea el 2 de febrero de 2018. Disponible en: https://www.contraloria.gob.pa/inec/Publicaciones/Publicaciones.aspx?ID_SUBCATEGORIA=11&ID_PUBLICACION=852&ID_IDIOMA=1&ID_CATEGORIA=4

- JONES, J. B. 1998. Plant Nutrition. CRC Press. Florida. USA. 140p.
- LINDSAY W.L; COX F.R. 1985. Micronutrients soil test for tropics. Fertilizer Research 7:169-200.pp
- MENGEL, K; KIRKBY, E. A. 2000. Principios de nutrición vegetal. 4 ed. Melgar; Ruiz, M. eds, IPI (International Potash Institute), Basel, Switzerland. 692 p.
- MOLINA, E. 2014. Acidez de suelos y uso de enmiendas. Centro de Investigaciones Agronómicas, Universidad de Costa Rica.29-34pp
- NAME, B; CORDERO, A. 1987. Recomendaciones para la fertilización de suelos: Hojas guías por cultivo. En:S. Jaramillo editor, Compendio de los resultados de Investigación presentados en la Jornada Científica. IDIAP. Santiago, PAN. 22 p.
- POTASH & PHOSPHATE INSTITUTE. 1997. Manual Internacional de Fertilidad de Suelos. Georgia. USA.35p
- QUINTERO, C; BOSCHETTI, N.; BENAVIDEZ R. 1996. Estimación de la capacidad máxima de adsorción de fosfatos en suelos de entre ríos. Facultad de ciencias agropecuarias UNER CC Entre Ríos, Argentina. 79-82pp.

ANEXO

ANÁLISIS DE REGRESIÓN CUADRÁTICA PARA LAS VARIABLES EN ESTUDIO

Rendimiento

Fuente de variación	gl	Loc.1	Loc.2	Loc.3	Loc.4	Loc.5
Regresión	1	0.48	0.00	0.01	0.52	0.06
Error	19	0.40	0.69	2.77	0.34	0.40
R ²		0.06	0.00	0.00	0.08	0.01

Altura de planta

Fuente de variación	gl	Loc.1	Loc.2	Loc.3	Loc.4	Loc.5
Regresión	1	171.43	171.43	171.43	171.43	171.43
Error	19	305.01	305.01	305.01	305.01	305.01
R ²		0.03	0.03	0.03	0.03	0.03

Plantas por metro cuadrado

Fuente de variación	gl	Loc.1	Loc.2	Loc.3	Loc.4	Loc.5
Regresión	1	0.03	0.04	0.26	0.04	0.02
Error	19	0.13	0.08	0.08	0.06	0.05
R ²		0.01	0.02	0.15	0.03	0.02

Mazorcas por metro cuadrado

Fuente de variación	gl	Loc.1	Loc.2	Loc.3	Loc.4	Loc.5
Regresión	1	0.00	0.00	0.01	0.19	0.00
Error	19	0.10	0.09	0.35	0.07	0.06
R ²		0.00	-0.05	0.00	0.13	0.00

Acame

Fuente de variación	gl	Loc.1	Loc.2	Loc.3	Loc.4	Loc.5
Regresión	1	40.24	0.31	5.52	28.88	83.56
Error	19	19.44	6.48	11.72	111.08	45.50
R ²		0.10	0.00	0.02	0.01	0.09

Materia Seca

Fuente de variación	gl	Loc.1	Loc.2	Loc.3	Loc.4	Loc.5
Regresión	1	0.09	5.76	0.00	0.52	1.10
Error	19	0.58	4.78	5.17	2.55	3.26
R ²		0.01	0.06	0.00	0.01	0.02